

Integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material zur Steigerung der Ressourceneffizienz

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

Von

Pascal Dominik Stoffels

Saarbrücken

2017

Tag des Kolloquiums: 19.12.2017

Dekanin/Dekan: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Mitglieder des

Prüfungsausschusses: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Frey
Dr.-Ing. Emanuele Grasso

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Aufgrund knapper werdender Ressourcen und den durch den Ressourceneinsatz verursachten Umweltauswirkungen rückt die Ressourceneffizienz entlang des Produktlebenszyklus immer stärker in den Fokus. Sie wird maßgeblich durch die Kombination von Produkt, Produktion und Material bestimmt.

Die Ressourceneffizienz berücksichtigt neben dem Ressourceneinsatz auch die technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit, weshalb eine mehrdimensionale Betrachtung erforderlich ist. Eine Adressierung der Ressourceneffizienz bereits während der Entwicklung innerhalb der drei Fachbereiche Produkt-, Produktions- und Materialdefinition bietet das größte Potential für eine positive Einflussnahme, da dort die verantwortlichen Merkmale festgelegt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein integriertes Prozessmodell zur Definition von Produkt, Produktion und Material vorgestellt, das integrierte Bewertungs- und Auswahlphasen in der Konzept- und Komponentenphase einführt. Dort erfolgt zunächst eine ökologisch-technisch-wirtschaftliche Bewertung von alternativen Kombinationen aus Produktlösung, Produktionslösung und Materiallösung. Auf Basis der Ergebnisse lassen sich im Anschluss die im weiteren Verlauf zu betrachtenden Kombinationen eingrenzen und schließlich auswählen.

Dieser Vorgang wird durch den integrierten morphologischen Kasten methodisch unterstützt, für dessen effizienten Einsatz ein Software-Prototyp entwickelt wurde.

Abstract

Due to the growing scarcity of resources and the environmental impacts caused by resource consumption resource efficiency along the product lifecycle is becoming increasingly important. Resource efficiency is determined by the combination of product, production and material.

In addition to the resource use, resource efficiency also takes into consideration the technical and economic performance. For this reason, a multidimensional view is required.

Addressing resource efficiency already during development within the three fields product, production and material definition provides the largest potential for positive influence, as the responsible characteristics are determined there.

This thesis presents an integrated process model that focuses on the definition of product, production and material and introduces integrated assessment and selection steps within the concept and component phases. The process begins with an ecological-technical-economical assessment of alternative combinations of product, production and material solution. Based on the assessments results, the further considered combinations are narrowed and finally selected.

An appropriate method, the integrated morphological chart implemented in an efficient software tool, supports this process.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik an der Universität des Saarlandes von Januar 2015 bis Dezember 2017 und am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik von Januar 2013 bis Dezember 2014 entstanden.

Zunächst möchte ich mich besonders bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit bedanken. Durch seine in jeder Situation positive Sichtweise, seine motivierende, fachliche und menschliche Führung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die zahlreichen fachlichen Diskussionen hatte ich ein optimales Arbeitsumfeld.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik an der Universität des Saarlandes für die Übernahme des Zweitgutachtens, das inhaltliche Interesse, seine motivierende Art und die konstruktiven Diskussionen bei der Erstellung der Arbeit ganz herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Kollegen am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Jerome Kaspar, Jonas Hauptenthal, Tobias Lüdeke, Benjamin Illmer, Jan Schneberger, Uta Wilhelm und Germano Porta und meinen ehemaligen Kollegen am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik Marcel Otto und Matthias Scholer für die fachlichen Diskussionen, die tolle Zusammenarbeit und die stets freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Bei meinem Arbeitskollegen Jerome Kaspar bedanke ich mich herzlich für die Unterstützung bei der Durchsicht der Arbeit und die fachlichen Diskussionen. Mein Dank gilt auch Matthias Kurtenacker, der mich bei der Entwicklung der Softwarelösung unterstützt hat sowie Marc Regitz und Peter Schmidt, die bei den Validierungsbeispielen mitgewirkt haben.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Lebensgefährtin Christine für das anhaltende Verständnis und die Unterstützung bedanken.

I Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Abstract.....	III
Danksagung.....	V
I Inhaltsverzeichnis.....	VII
II Abbildungsverzeichnis.....	XI
III Tabellenverzeichnis.....	XV
IV Symbol- und Formelverzeichnis	XVII
V Abkürzungsverzeichnis	XIX
1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Fokus und Ziel der Arbeit.....	3
1.2.1 Ziele und inhaltliche Abgrenzung	3
1.2.2 Forschungsfragen	6
1.3 Vorgehensweise und Struktur	7
2 Problematik der Ressourcennutzung	11
2.1 Weltweite Rohstoffsituation	12
2.2 Weltweite Energiesituation	16
3 Grundlagen	19
3.1 Begriffsdefinitionen	19
3.1.1 Begriffe aus dem Umfeld der Produktentwicklung.....	22
3.1.2 Begriffe aus dem Umfeld der Entwicklung von Produktionssystemen.....	22
3.1.3 Begriffe aus dem Umfeld der Materialauswahl	24
3.1.4 Begriffe aus dem Umfeld der integrierten Entwicklung.....	24
3.2 Produktentstehung.....	25
3.2.1 Produktentwicklung.....	26
3.2.2 Produktionssystementwicklung	35

4	Stand der Technik.....	51
4.1	Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering.....	52
4.2	Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung.....	60
4.3	Auswahl von Produktlösungen.....	74
4.4	Materialauswahlmethoden.....	76
4.5	Auswahl von Fertigungstechnologien und -anlagen.....	79
4.6	Bewertungsmethoden.....	86
4.6.1	Technische Bewertung.....	86
4.6.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	88
4.6.3	Ökologische Bewertung.....	90
4.6.4	Kombinierte Bewertung.....	95
5	Defizite und Handlungsbedarf.....	99
6	Integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material	105
6.1	Integrierte Beschreibung von Produkt-, Produktions- und Materialdefinition	106
6.1.1	Produktdefinition	108
6.1.2	Produktionsdefinition.....	109
6.1.3	Materialdefinition	114
6.1.4	Zusammenhänge zwischen Produkt, Material und Produktionssystem.....	115
6.2	Integriertes Prozessmodell zur Definition von Produkt, Produktion und Material ...	119
6.2.1	Übergreifende Bewertung und Auswahl von Kombinationen alternativer Lösungen	122
6.2.2	Integrierte Konzeptdefinition.....	125
6.2.3	Integrierte Komponentendefinition.....	130
6.2.4	Integrierte Systemevaluation.....	134
6.2.5	Übersicht der Lösungsentwicklung	137
6.3	Integrierte Bewertungs- und Auswahlmethode.....	139
6.4	Umsetzung eines Software-Prototyps.....	147
7	Validierungsbeispiele.....	153
7.1	Entwicklung eines Konzepts für ein nicht-schaltbares Getriebe.....	153
7.2	Änderungsentwicklung eines Stoßdämpfers.....	165
7.3	Diskussion der Ergebnisse	172

8	Zusammenfassung und Ausblick	175
8.1	Zusammenfassung der Arbeit.....	175
8.2	Beantwortung der Forschungsfragen	176
8.3	Fazit und Ausblick	178
9	Literaturverzeichnis.....	181
10	Glossar.....	197

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Definition von Produkt, Produktion und Material in Verbindung mit dem Lebenszyklus des Produkts und des Produktionssystems (in Anlehnung an [ViSt14, SBFV15]).....	2
Abbildung 2: Verzahnung von Produkt, Produktionssystem und Material	3
Abbildung 3: Zentrale Säulen der Arbeit.....	7
Abbildung 4: Struktur der Arbeit.....	8
Abbildung 5: Einteilung der Ressourcen (in Anlehnung an [VDI4800])	11
Abbildung 6: Durch die Rohstoffförderung und -nutzung verursachte Umweltauswirkungen (basierend auf [FCHH12, VDI4800])	12
Abbildung 7: Globaler Rohstoffverbrauch nach Regionen (basierend auf Daten von [www1]) ..	13
Abbildung 8: Globales Bevölkerungswachstum nach Regionen (basierend auf Daten von [UN15a, UN15b])	13
Abbildung 9: Globale Rohstoffentnahme (basierend auf Daten von [KGEE09])	14
Abbildung 10: Übersicht der Begrifflichkeiten im Zusammenspiel von Produkt, Material und Produktionssystem nach dem Verständnis dieser Arbeit	20
Abbildung 11: Produktentstehungsprozess (in Anlehnung an [Viel05]).....	26
Abbildung 12: VDI-Richtlinie 2221 zur Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme und Produkte (in Anlehnung an [VDI2221])	28
Abbildung 13: Allgemeiner Produktentwicklungsprozess nach Ulrich und Eppinger (in Anlehnung an [UIEp08]).....	29
Abbildung 14: Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses durch Quality Function Deployment (QFD) von [Akao90] (basierend auf [HaCl88, StVi15]).....	30
Abbildung 15: Axiomatic-Design-Ansatz in der Produktentwicklung (in Anlehnung an [Suh90])	32
Abbildung 16: CPM/PDD-Ansatz (in Anlehnung an [Webe05])	33
Abbildung 17: Produktionssystem als Transformationssystem (in Anlehnung an [HuEd88])	36
Abbildung 18: Arbeitsplanung im Rahmen der Produktentstehung (in Anlehnung an [Mino75, Ever02]).....	38

Abbildung 19: REFA Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme (in Anlehnung an [REFA90])	39
Abbildung 20: Produktionssystementwicklungsprozess nach Bellgran und Säfsten (in Anlehnung an [BeSä10, Bell98])	40
Abbildung 21: Axiomatic Design für Produktionssysteme (basierend auf [Suh90, Suh95]).....	42
Abbildung 22: Entwicklung von Produktionssystemen nach Gu et al. (basierend auf [GuRT01]).....	43
Abbildung 23: Entwicklung von Produktionssystemen nach der VDI-Richtlinie 4499 (in Anlehnung an [VDI4499])	45
Abbildung 24: Allgemeine Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produktionssystemen nach Wu (in Anlehnung an [Wu94])	46
Abbildung 25: Produktionsplanung nach Spur (in Anlehnung an [Spur94]).....	47
Abbildung 26: Auswahl der Themenbereiche im Stand der Technik.....	51
Abbildung 27: Vier Möglichkeiten der Kommunikation zwischen voneinander abhängigen Prozessen (in Anlehnung an [WhCI92]).....	53
Abbildung 28: Allgemeine Vorgehensweise von DFMA mithilfe von DFMA-Software (in Anlehnung an [BoDK02])	55
Abbildung 29: Informationen als zentrales Objekt im Rahmen einer gleichzeitigen Entwicklung von Produkt und Prozess (in Anlehnung an [EBGK97]).....	57
Abbildung 30: Eingrenzen der möglichen Lösungen im Set-Based Concurrent Engineering (in Anlehnung an [Bern98])	59
Abbildung 31: Integrierter Produktentwicklungsprozess nach Andreasen und Hein (in Anlehnung an [AnHe00])	61
Abbildung 32: Rahmenkonzept einer integrierten Produkt- und Prozessgestaltung nach Eversheim et al. (in Anlehnung an [EvSA05])	63
Abbildung 33: Kooperatives Produkt-Engineering (in Anlehnung an [GLRW00])	65
Abbildung 34: Integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem nach Gausemeier und Plass (in Anlehnung an [GaPl14])	66
Abbildung 35: Vorgehensweise bei der integrativen Konzeptionierung von Produkt und Produktionssystem (in Anlehnung an [Nord12]).....	68
Abbildung 36: Kombierter Werkstoff-, Fertigungsverfahren - und Geometriesyntheseprozess (in Anlehnung an [Bend11])	71

Abbildung 37: Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktionssystem nach Michaelis et al. (in Anlehnung an [MiJE15])	73
Abbildung 38: a) Vorgehensweise zur Lösungsauswahl (basierend auf [PBFG06]) b) Morphologischer Kasten (in Anlehnung an [PBFG06]).....	76
Abbildung 39: a) Vier Hauptschritte bei der Materialauswahl nach Ashby b) Eingrenzen der Materialien (in Anlehnung an [Ashb05])	77
Abbildung 40: Screening-Bereich der CES-Software (basierend auf [Gran15])	78
Abbildung 41: Materialauswahl nach Farag (in Anlehnung an [Fara14])	79
Abbildung 42: Prozessauswahl nach Swift und Booker (in Anlehnung an [SwBo03])	80
Abbildung 43: Generierung alternativer Prozessketten nach Fallböhmer (in Anlehnung an [Fall00])	82
Abbildung 44: Vorgehensweise zur Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen nach Trommer (in Anlehnung an [Trom01])	83
Abbildung 45: Generierung von Produktionsverfahrensketten nach Müller (in Anlehnung an [Müll08])	85
Abbildung 46: a) Stärkediagramm b) Bewertungsschema (in Anlehnung an [VDI2225]).....	96
Abbildung 47: Bestandteile des Gesamtkonzepts der Arbeit	105
Abbildung 48: Gegenüberstellung und Gliederung der Entwicklungsphasen und -ergebnisse von Produkt-, Produktions- und Materialdefinition (in Anlehnung an [SKBV17b], basierend auf [SBFV15] und [StVi15])	107
Abbildung 49: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN8580 [DIN8580], gegliedert nach [Fall00]	110
Abbildung 50: Produktionsfunktionen für die Herstellung einer Zahnradkombination.....	111
Abbildung 51: Entwicklung von Produktionsfunktionen und Technologien, basierend auf Wirkprinzipien	113
Abbildung 52: Abhängigkeiten zwischen Produkt, Produktionssystem und Material (in Anlehnung an [StVi15], basierend auf dem CPM-Ansatz von [Webe05] und [DZBW06])	117
Abbildung 53: Integriertes Prozessmodell (in Anlehnung an [SKBV17b], basierend auf [SLGV14], [StVi16a])	120
Abbildung 54: Allgemeines Schema der übergreifenden Bewertung und Auswahl von Kombinationen potenzieller alternativer Lösungen.....	123

Abbildung 55: Integrierte Konzeptdefinition	126
Abbildung 56: Integrierte Bewertung und Auswahl von Wirkprinzipien, Technologien und Materialsuklassen.....	129
Abbildung 57: Integrierte Komponentendefinition	131
Abbildung 58: Integrierte Bewertung und Auswahl von Komponenten, Anlagen und Materialien	133
Abbildung 59: Integrierte Systemevaluierung	135
Abbildung 60: Integrierte Evaluation	136
Abbildung 61: Übersicht der Lösungsentwicklung	138
Abbildung 62: Struktur des integrierten morphologischen Kastens	140
Abbildung 63: Aufstellung des integrierten morphologischen Kastens (in Anlehnung an [StVi16b])	141
Abbildung 64: Fixierung einer Dimension des morphologischen Kastens.....	142
Abbildung 65: Vorgehensweise bei der Lösungsauswahl innerhalb des integrierten morphologischen Kastens	144
Abbildung 66: Beispiel für den integrierten morphologischen Kasten (basierend auf [StVi16b] und [SKBV17a])	146
Abbildung 67: Struktur der Softwarelösung	148
Abbildung 68: Übersichtsfenster des integrierten Auswahl-Tools.....	150
Abbildung 69: Auswahlfenster für die Produktfunktion „Drehmoment übertragen“ (für Druckversion nachbearbeitet).....	163
Abbildung 70: Auswahlfenster für alternative Materialsuklassen für eine Zahnradkombination (für Druckversion nachbearbeitet).....	164
Abbildung 71: Ergebnisse der Auswahl für das nicht-schaltbare Getriebe	165
Abbildung 72: a) PKW Stoßdämpfer b) Gestaltvariante 1 des Stoßdämpfers c) Gestaltvariante 2 des Stoßdämpfers (in Anlehnung an [Schm17]).....	167
Abbildung 73: Auswahl des Materials für das Stoßdämpferrohr (in Anlehnung an [Schm17], für Druckversion nachbearbeitet).....	171
Abbildung 74: Auswahl der Produktionsanlage für den Fügevorgang (in Anlehnung an [Schm17], für Druckversion nachbearbeitet).....	172

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inhaltliche Abgrenzung der Arbeit	5
Tabelle 2: Jährliche Produktion und Reserven ausgewählter Metalle (basierend auf Daten von [USGS16])	15
Tabelle 3: Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Produkten	34
Tabelle 4: Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Produktionssystemen.....	49
Tabelle 5: Kriterien für die Ressourcenkritikalität nach Ashby (basierend auf [Gran15])	94
Tabelle 6: Analyse der wesentlichen Vorgehensweisen aus dem Stand der Technik	101
Tabelle 7: Analyse der Bewertungsmethoden aus dem Stand der Technik	102
Tabelle 8: Defizite bisheriger Vorgehensweisen und Ansätze	103
Tabelle 9: Auszug aus der Anforderungsliste des Getriebes.....	154
Tabelle 10: Wesentliche Funktionen des Getriebes	154
Tabelle 11: Alternative Wirkprinzipien zur Funktionserfüllung	155
Tabelle 12: Betrachtete Produktionsfunktionen mit alternativen Technologien zur Herstellung des Getriebes.....	156
Tabelle 13: Aus den Wirkprinzipien abgeleitete Materialeigenschaften und Materialsubklassen.....	157
Tabelle 14: Bewertungsformular für die Kombinationen aus Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen.....	158
Tabelle 15: Kosten, Energieaufwand, Ressourcenkritikalität sowie Ressourcenaufwand ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15]).....	158
Tabelle 16: Auszug aus dem Energieaufwand verschiedener Technologien in Abhängigkeit ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15]).....	159
Tabelle 17: Auszug aus den Kosten verschiedener Technologien in Abhängigkeit ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15]).....	159
Tabelle 18: Material-Intensität (abiotisch) für verschiedene Materialien (basierend auf Daten von [WELR11, Wupp14])	160
Tabelle 19: Berechnung der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien.....	161

Tabelle 20: Auszug aus der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien in Abhängigkeit der Technologien	162
Tabelle 21: Auszug aus der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien in Abhängigkeit der Materialien	162
Tabelle 22: Auszug aus der Anforderungsliste des Stoßdämpfers (in Anlehnung an [Schm17])	166
Tabelle 23: Bewertungskriterien für den Umgang mit Ausschuss aus ökologischer Sicht	169
Tabelle 24: Materialkosten, Energieaufwand für die Materialbereitstellung und Ressourcenkritikalität (in Anlehnung an [Schm17], basierend auf Daten von [Gran15])	169
Tabelle 25: Normierte Werte für Materialkosten, Energieaufwand für die Materialbereitstellung und Ressourcenkritikalität (in Anlehnung an [Schm17], basierend auf Daten von [Gran15])	169
Tabelle 26: Technische Wertigkeit des Materials in Abhängigkeit der Produktionsanlage	170

IV Symbol- und Formelverzeichnis

g_w	Gewichtungsfaktor für einen Kennwert
n	Anzahl der Kennwerte
$W_{\text{ö}}(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M1,1})$	Ökologische Wertigkeit einer Kombination
$W_{\text{ö},n}$	Ökologische Wertigkeit eines Kennwerts
$W_{\text{T}}(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M1,1})$	Technische Wertigkeit einer Kombination
$W_{\text{T},n}$	Technische Wertigkeit eines Kennwerts
$W_{\text{W}}(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M1,1})$	Wirtschaftliche Wertigkeit einer Kombination
$W_{\text{W},n}$	Wirtschaftliche Wertigkeit eines Kennwerts

V Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytic Hierarchy Process
AIM	Aktivitäten-Informationen-Matrix
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CES	Cambridge Engineering Selector
CFD	Concurrent Function Deployment
CPM	Characteristics-Properties Modelling
DFA	Design for Assembly
DFM	Design for Manufacture
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
FEM	Finite-Elemente-Methode
FIPS	Flächenintensität pro Serviceeinheit
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
HOV	House of Value
IAM	Informationen-Abhängigkeiten-Matrix
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KNA	Kumulierter Nichtenergetischer Aufwand
KPA	Kumulierter Prozessaufwand
MIM	Methoden-Informationen-Matrix
MIPS	Material-Input pro Serviceeinheit
NEV	Nichtenergetischer Verbrauch
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OLAP	Online Analytical Processing
PA	Polyamid
PDD	Property-Driven Development
PET	Polyethylenterephthalat
PLM	Product Lifecycle Management
QFD	Quality Function Deployment
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.

SBCE	Set-Based Concurrent Engineering
SE	Simultaneous Engineering
SEI	Stoffgebundener Energieinhalt
SOP	Start of Production
TIM	Technisches-System-Informationen-Matrix
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung und Motivation

In Kapitel 1 wird zunächst die Problemstellung der Arbeit vorgestellt sowie die Motivation für das Thema erläutert. Daraufhin erfolgt die Beschreibung der Ziele der Arbeit und die Abgrenzung des Inhalts. Anschließend wird die Vorgehensweise und Struktur der Arbeit präsentiert.

1.1 Problemstellung und Motivation

Heutzutage wird der Ressourceneinsatz und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen von Produkten oder Dienstleistungen, wenn überhaupt, oft erst im Anschluss an die eigentliche Entwicklung umfassend analysiert, um die Ergebnisse beispielsweise für Marketingzwecke aufzubereiten. In den letzten Jahren hat sich jedoch die weltweite Ressourcensituation zunehmend verschärft, während eine Besserung nicht in Sicht und eine weitere Anspannung der Lage wahrscheinlich ist. Dadurch rückt das Thema Ressourceneffizienz immer stärker in den Vordergrund. Je früher der Einsatz an Ressourcen während des Produktlebenszyklus im Produktentstehungsprozess berücksichtigt wird, desto größer sind die Möglichkeiten einer positiven Beeinflussung [ScAp14]. Korrektive Änderungen in fortgeschrittenen Phasen verantworten einen höheren Arbeitsaufwand sowie steigende Kosten aufgrund von Änderungen.

Der Einsatz von Ressourcen verursacht meist erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt [FCHH]. Als Umweltauswirkungen werden allgemein alle positiven wie negativen Veränderungen der Umwelt bezeichnet, die durch ein Produkt oder eine Dienstleistung hervorgerufen werden [EG2009]. Bei der objektiven Analyse der Umweltauswirkungen gehört die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus inklusive aller untergeordneten Prozesse zu den notwendigen Grundsätzen [ISO14001, ISO14040]. Zu den Hauptprozessen zählen die Materialbereitstellung, die Herstellung, die Nutzung sowie die Entsorgung [ISO14001, Ashb13].

Die Herstellung von Produkten setzt entsprechende Produktionssysteme voraus, die fähig sind, die gewünschten Produktmerkmale zu realisieren. In der Produktionsphase, die gleichzeitig die Nutzungsphase des Produktionssystems ist, schneiden sich schließlich die Lebenswege von Produkt und Produktionssystem, wie in Abbildung 1 dargestellt ist. In einer systematisch durchgeführten ressourcenorientierten Produktanalyse müssen also alle Lebenszyklusphasen des Produktionssystems mitberücksichtigt werden.

Da die Beeinflussung des Ressourceneinsatzes während der Entwicklung am größten ist [ScAp14] und die Merkmale des Produktionssystems sehr stark von den Produktmerkmalen abhängen,

ergibt sich das größte Optimierungspotenzial durch eine integrierte Entwicklung beider Systeme. Das Produkt und das Produktionssystem stehen außerdem mit dem verwendeten Material im Zusammenhang, weshalb die Materialauswahl ebenfalls integriert wird.

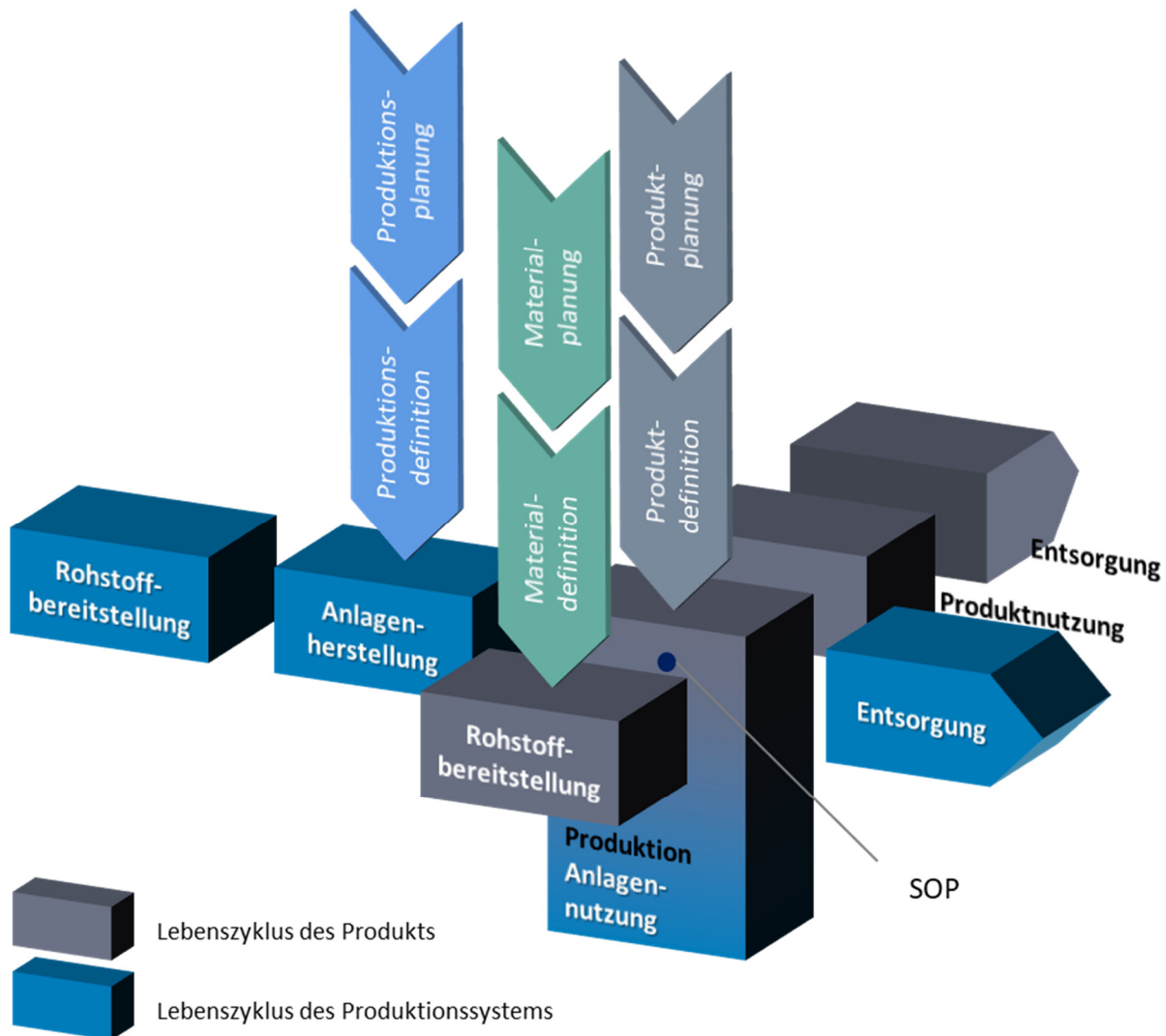


Abbildung 1: Definition von Produkt, Produktion und Material in Verbindung mit dem Lebenszyklus des Produkts und des Produktionssystems (in Anlehnung an [ViSt14, SBFV15])

Die einheitliche Beschreibung der drei Entwicklungsprozesse mit ihren Phasen und Ergebnissen sowie ihren Zusammenhängen ist ein grundlegender Baustein dieser Arbeit. Dadurch können Anknüpfungspunkte identifiziert und entsprechende Methoden an diesen Stellen angesetzt werden. Die integrierte Bewertung und Auswahl von Lösungskombinationen stellt sich hierbei als zentrale Herausforderung heraus. Neben den ökologischen Kriterien sind auch technische und wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen, um wettbewerbsfähige Produkte zu generieren. Ressourceneffizienz beschreibt vor diesem Hintergrund das Verhältnis zwischen dem Ressourceneinsatz (repräsentiert durch die ökologischen Kriterien), den Kosten (wirtschaftliche Kriterien),

und dem technischen Nutzen (technische Kriterien). Die Rangordnung der Kriterien wird dabei durch den Markt, gesetzliche Regelungen oder andere Stakeholder vorgegeben.

Im Sinne einer einheitlichen Beschreibung werden in dieser Arbeit die Begriffe *Produktdefinition*, *Produktionsdefinition* und *Materialdefinition* als Synonyme zu *Produktentwicklung*, *Technische Produktionsplanung* bzw. *Produktionssystementwicklung* und *Materialauswahl* verwendet und als Fachbereiche bezeichnet. Im Stand der Technik werden wiederum die Begriffe aus den jeweiligen Quellen verwendet.

1.2 Fokus und Ziel der Arbeit

Das folgende Kapitel liefert einen kurzen Überblick über die wesentlichen Aspekte der Arbeit und stellt die mit der Arbeit verbundenen Ziele vor.

1.2.1 Ziele und inhaltliche Abgrenzung

Der größte Anteil der Ressourcenaufwände und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen des Produktlebenszyklus werden während der Entwicklung von Produkt, Produktionssystem und Material festgelegt [ScAp14]. Der Entwickler bestimmt in diesen Phasen die Merkmale des Produktes, des Produktionssystems und der verwendeten Materialien, die schließlich die ökologischen Eigenschaften bilden.

Darüber hinaus existiert für physische Produkte eine enge Verknüpfung zwischen dem Produkt, dem Produktionssystem, welches das Produkt herstellt, und dem Material (siehe Abbildung 2). Das Material wird durch das Produktionssystem bearbeitet um die physische Gestalt des Produktes zu materialisieren (gilt nur eingeschränkt für digitale Produkte und Dienstleistungen).

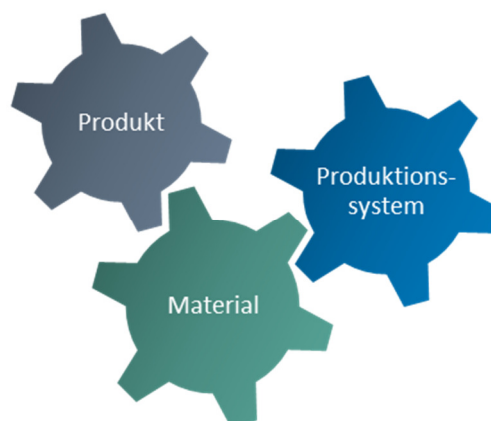


Abbildung 2: Verzahnung von Produkt, Produktionssystem und Material

Das Gesamtziel der Arbeit ist daher die Verbesserung der Ressourceneffizienz entlang des Produktlebenszyklus durch eine frühzeitige Beeinflussung innerhalb einer integrierten Produkt-, Produktions- und Materialdefinition mithilfe einer ökologisch-technisch-wirtschaftlichen Betrachtung.

Das Gesamtziel untergliedert sich in die folgenden drei Teilziele:

- Die Entwicklungsprozesse von Produkt, Produktionssystem und Materialauswahl sollen analysiert und Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den drei Dimensionen für eine Integration herausgearbeitet werden.
- Ein Gesamtkonzept aus Prozessmodell, Methodenunterstützung und Softwarelösung soll eingeführt werden, welches die übergreifende Definition von Produkt, Produktionssystem und Material unterstützt.
- Die Umsetzbarkeit des vorgestellten Gesamtkonzepts soll anhand eines Validierungsbeispiels nachgewiesen werden.

Aufgrund des sehr umfassenden Themenbereichs ist eine klare Eingrenzung der Arbeit notwendig. Der Fokus der Arbeit liegt auf einer fachbereichsübergreifenden Vorgehensweise und lässt aus diesem Grund fachbereichsinterne Ansätze außen vor, es sei denn, sie werden in die übergreifende Betrachtung als Hilfsmittel miteingebunden.

Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Punkte, welche in der Arbeit behandelt werden und welche nicht. Die Arbeit umfasst hierbei die Prozess-, Methoden- und IT-Toolsicht, deckt jedoch die Organisationssicht nicht mit ab, da der Schwerpunkt auf die Zusammenhänge zwischen den einzelnen technischen Komponenten bei der Entwicklung gelegt wird. Eine Betrachtung organisatorischer Aspekte wäre im Hinblick auf eine Einführung in Unternehmen dennoch sehr interessant. Außen vor gelassen werden außerdem die Produktplanung, die Produktionssystemplanung und die Materialplanung, da in diesen Phasen kaum konkrete technische Merkmale festgelegt werden. Eine tiefere Integration bereits zu diesem Zeitpunkt ist jedoch ein weiterer interessanter Ansatzpunkt. Bei der Produktionssystementwicklung werden im Speziellen die Personal- und Gebäudeplanung vernachlässigt und die Lager- und Transportplanung nur tangiert, da der Fokus zum einen auf automatisierten Anlagen und zum anderen auf den direkt-wertschöpfenden Prozessen liegt. Mit Produktionssystemen sind in der Arbeit daher die Anlagen bzw. Betriebsmittel oder Komponenten und die dort stattfindenden Prozesse gemeint.

Da die Beeinflussbarkeit während der Entwicklungsphasen am höchsten ist, liegt der Fokus der Arbeit auf der Entwicklung, im Besonderen auf der Konzept- und Komponentenphase, und vernachlässigt andere Phasen, in denen eine Reduzierung des Ressourceneinsatzes ebenfalls möglich wäre. In der Arbeit werden im Rahmen der Entwicklung alle Lebenszyklusphasen von der Materialbereitstellung über Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung adressiert.

In der Produktionsphase wird die Fertigung adressiert, während die Anwendbarkeit auf die Montage nur kurz angerissen wird. Dieser Aspekt ist ebenfalls sehr interessant, erfordert jedoch weitergehende umfangreiche theoretische Betrachtungen bezüglich der späteren Produktstruktur.

Die Arbeit stellt außerdem keine neuen detaillierten Bewertungsverfahren für den Ressourcenverbrauch vor, sondern bindet existierende, etablierte Verfahren in eine integrierte kombinierte Bewertung ein.

In-Scope	Out-of-Scope
Fachbereichsübergreifende Vorgehensweisen	Fachbereichsinterne Vorgehensweisen
Methoden, IT-Tools, Prozess	Organisation
Produktentwicklung, Produktionssystementwicklung, Materialauswahl	Produktplanung, Produktionssystemplanung
Konzeptphase, Komponentenphase	Systemintegration
Technische Aspekte	Organisatorische Aspekte, Personalplanung, Lager- und Transportplanung, Gebäudeplanung
Technische Produkte	Dienstleistungen, digitale Produkte
Ökologische Nachhaltigkeit	Soziale Nachhaltigkeit, wirtschaftliche Nachhaltigkeit
Fertigung	Montage

Tabelle 1: Inhaltliche Abgrenzung der Arbeit

1.2.2 Forschungsfragen

Auf Basis der zuvor definierten Ziele, sowie der inhaltlichen Abgrenzung, gilt es im Rahmen dieser Dissertation die folgenden Forschungsfragen zu beantworten. Die übergeordnete Forschungsfrage lautet:

Wie können die **Ressourceneffizienz** und die damit verbundenen **Umweltauswirkungen** von Produkten durch eine tiefere **Verzahnung** von **Produkt-, Produktions- und Materialdefinition** im Produktentstehungsprozess positiv **beeinflusst** werden?

Die übergeordnete Forschungsfrage lässt sich wiederum in die folgenden Teilforschungsfragen untergliedern, deren Lösung die zentralen Säulen dieser Arbeit darstellen (siehe Abbildung 3):

1. Wie können die Phasen und Ergebnisse der **Produkt-, Produktions- und Materialdefinition einheitlich beschrieben** werden?
2. Wie sieht ein **integrierter Produkt-, Produktions- und Materialdefinitionsprozess** aus, der die **Ressourceneffizienz** entlang des Produktlebenszyklus erhöht?
3. Wie kann eine Erhöhung der **Ressourceneffizienz** in einem integrierten Definitionsprozess **methodisch** unterstützt werden?
4. Wie können **IT-Tools** in einer integrierten Definition das Gesamtkonzept zur Steigerung der **Ressourceneffizienz** abbilden?

Forschungsfrage 1 entspricht hierbei dem ersten Teilziel, während die Forschungsfragen 2, 3 und 4 dem zweiten Teilziel entsprechen.

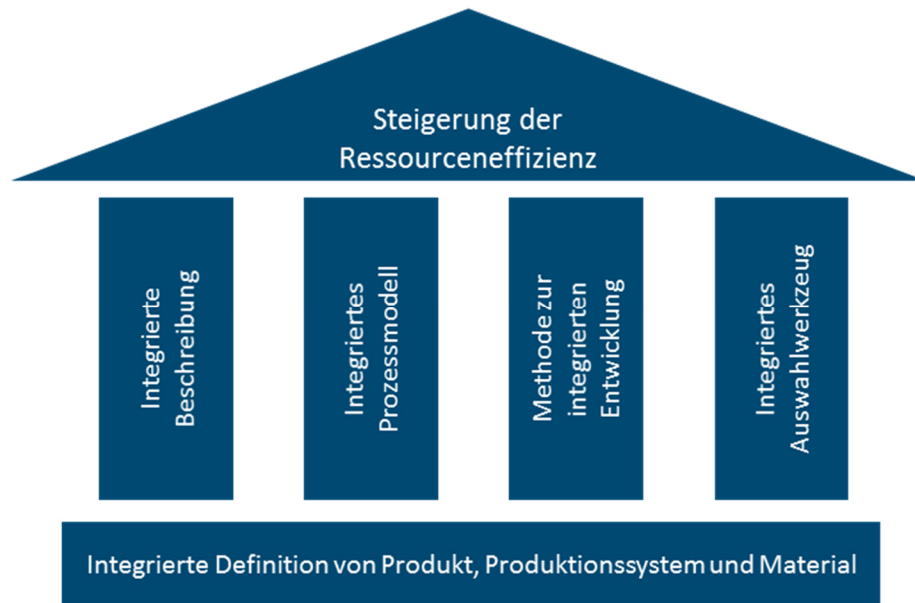


Abbildung 3: Zentrale Säulen der Arbeit

1.3 Vorgehensweise und Struktur

Die Struktur der vorliegenden Arbeit wird in Abbildung 4 dargestellt. Nach einer kurzen Motivation werden die Ziele, der Umfang der Arbeit sowie die grundlegende Vorgehensweise und Struktur erläutert (Kapitel 1). Kapitel 2 beleuchtet nachfolgend die Problematik der Ressourcennutzung.

Im Anschluss (Kapitel 3) erfolgt die Betrachtung der Grundlagen, die für das Thema relevant sind. Dazu wird neben den wichtigsten Begriffsdefinitionen (Kapitel 3.1) ein kurzer Einblick in die beiden klassischen Fachbereiche Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung mit gängigen Prozessen und Methoden gewährt (Kapitel 3.2).

Die Materialauswahl (die eigentlich zur Produktentwicklung gehört, hier aber als eigenständiger Fachbereich aufgeführt wird), Vorgehensweisen, die die klassischen Fachbereiche besser verzahnen sollen (integrierte Ansätze) und einzelne Bausteine (z.B. die Auswahl von Produktionsverfahren) und Bewertungsverfahren für eine integrierte Definition werden in Kapitel 4 (Stand der Technik) vorgestellt. Daraus können die Defizite der bisherigen Vorgehensweisen und Ansätze herausgearbeitet und der Handlungsbedarf für einen neuen Ansatz abgeleitet werden (Kapitel 5).

In Kapitel 6 wird schließlich das neu entwickelte Gesamtkonzept vorgestellt. Dieses beinhaltet eine konsistente Beschreibung der Definitionsphasen mit den jeweiligen Ergebnissen, einen integrierten Entwicklungsprozess, eine übergreifende Bewertungs- und Auswahlmethode und die Umsetzung dieser innerhalb einer effizienten Softwarelösung.

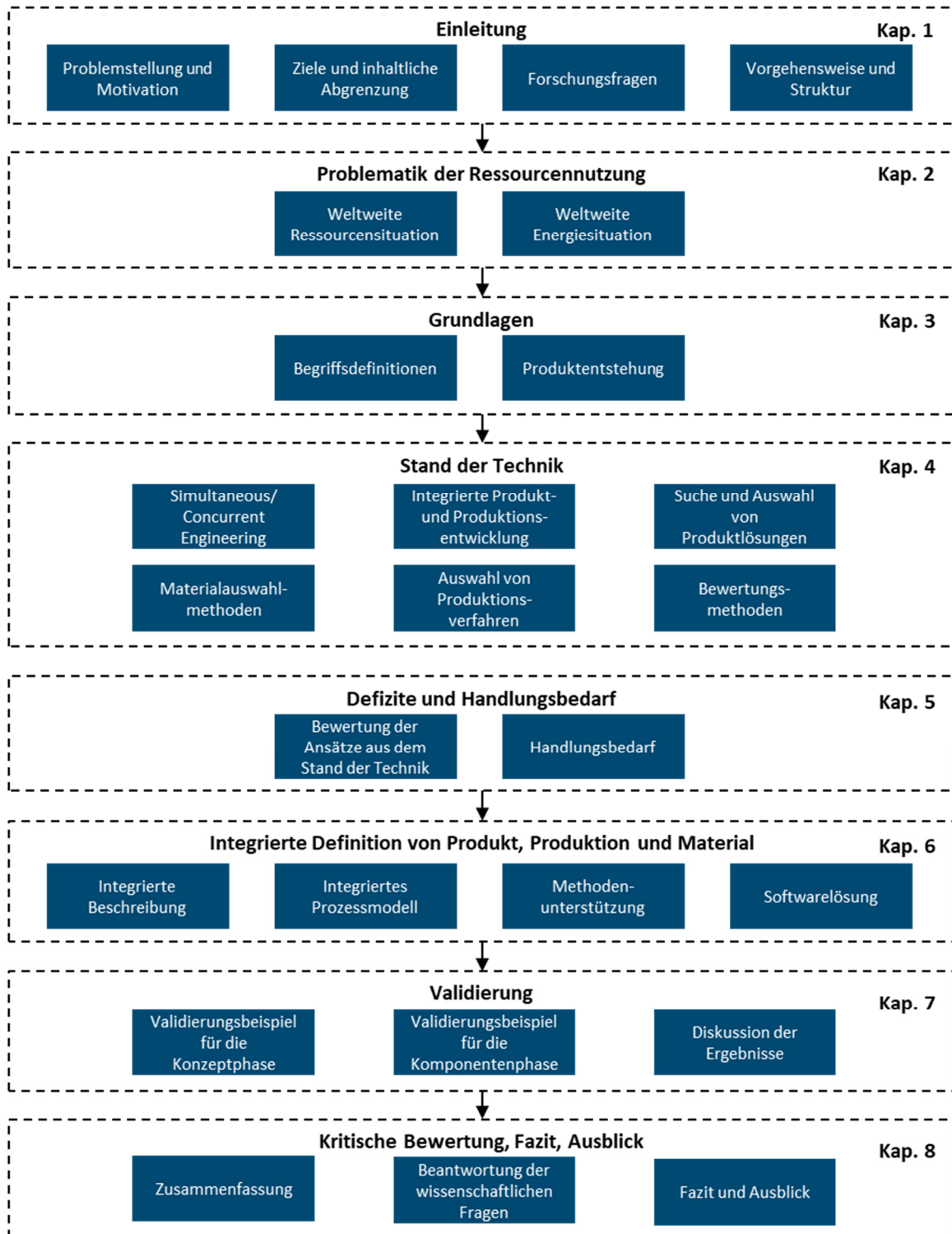


Abbildung 4: Struktur der Arbeit

Um sicherzustellen, dass der entwickelte Ansatz die übergreifende Entwicklung verbessert, ist eine entsprechende Validierung anhand zweier ausgewählter Beispiele in Kapitel 7 angesetzt. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst, die Beantwortung der Forschungsfragestellung untersucht und es werden offene Punkte diskutiert, die gegebenenfalls durch weitere wissenschaftliche Arbeiten erforscht werden sollten (Kapitel 8).

2 Problematik der Ressourcennutzung

Im Folgenden wird dargestellt, warum gerade der Ressourceneinsatz neben klassischen Randbedingungen wie Zeit, Kosten und Qualität bei der Entwicklung von technischen Systemen immer relevanter wird.

Zu den natürlichen Ressourcen zählen, wie in Abbildung 5 dargestellt, materielle Rohstoffe (erneuerbare und nicht erneuerbare), Energieressourcen (Energierohstoffe, strömende Ressourcen und Strahlungsenergie), Wasser, Luft, Flächen und Böden sowie die Ökosystemleistung (z.B. als Senke für Emissionen usw.) [VDI4800]. Der Verbrauch dieser Ressourcen wird im Rahmen der Arbeit durch ökologische Kriterien adressiert. Neben den natürlichen Ressourcen gibt es auch weitere Ressourcen, wie z.B. das Personal oder die Betriebsmittel.

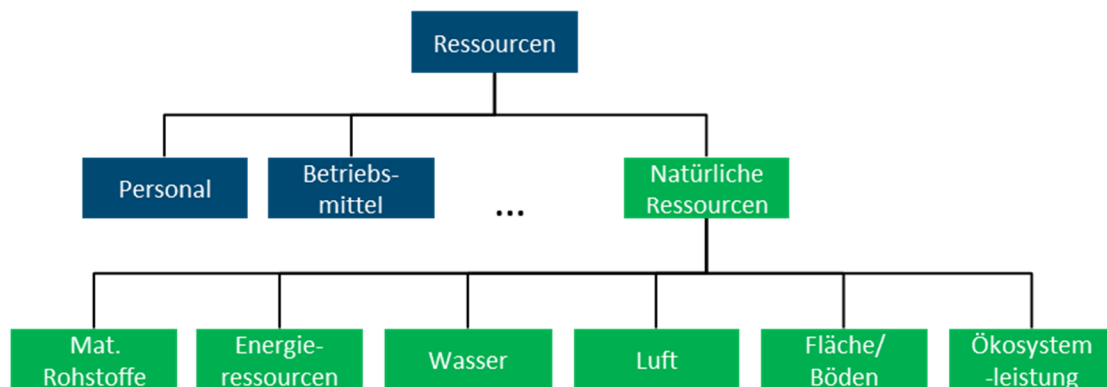


Abbildung 5: Einteilung der Ressourcen (in Anlehnung an [VDI4800])

Für die Herstellung, Nutzung und Entsorgung technischer Produkte werden beispielsweise Rohstoffe, wie Erze, Industriemineralien, fossile Energieträger und Biomasse sowie Energie benötigt. Die Nutzung dieser Rohstoffe hat einen signifikanten Einfluss auf die Umwelt. Bei der Förderung von Rohstoffen werden Landschaften und Lebensräume großflächig zerstört. Des Weiteren entstehen sowohl bei der Förderung als auch der Nutzung Emissionen in Luft, Boden und Wasser sowie Abfälle (siehe Abbildung 6). [FCHH12]

Da viele Rohstoffe in weniger entwickelten oder politisch instabilen Gegenden der Erde gefördert werden, stehen auch soziale Aspekte wie prekäre Arbeitsverhältnisse oder potenzielle Konflikte im Fokus. In Kapitel 2.1 wird die weltweite Rohstoffsituation näher beleuchtet und herausgearbeitet, warum eine Reduzierung des Rohstoffverbrauchs dringend notwendig ist.

Der Verbrauch von Energie wird in vielen Bereichen häufig isoliert betrachtet, da dieser eine etablierte Bewertungsgröße darstellt. Daher wird die Energiesituation in Kapitel 2.2 kurz gesondert betrachtet. Schlussendlich ist der Energieverbrauch jedoch eine Untermenge des Ressourcenverbrauchs.

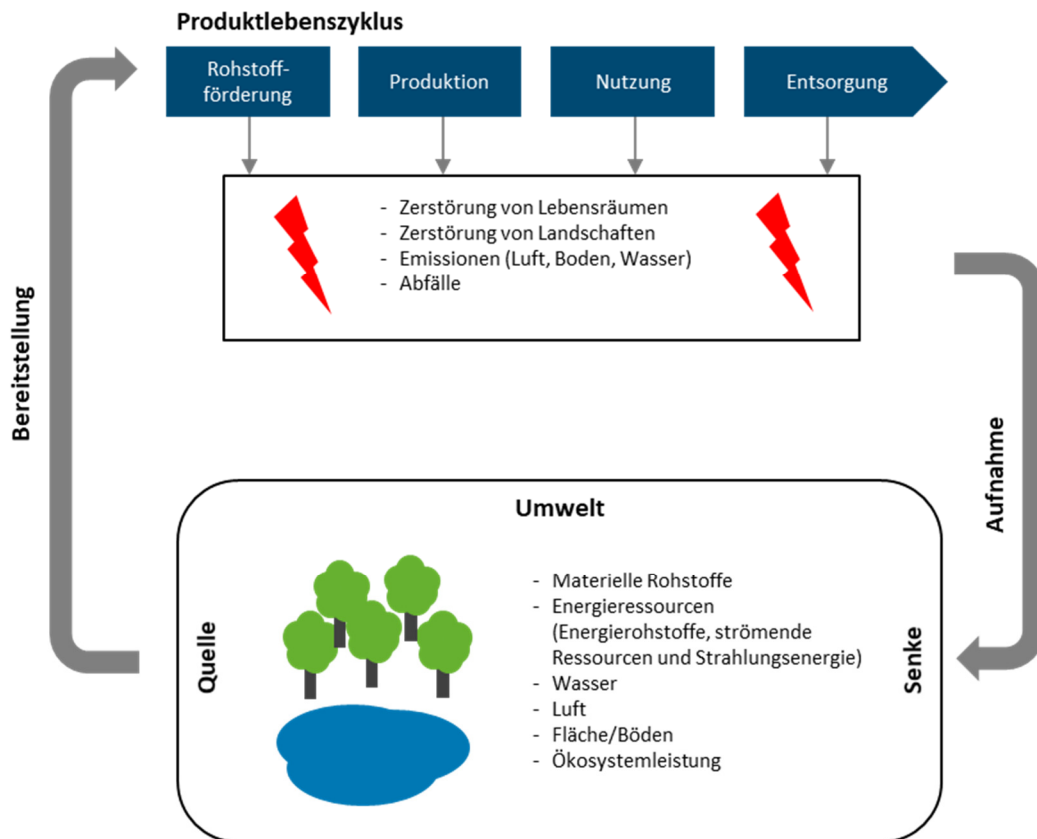


Abbildung 6: Durch die Rohstoffförderung und -nutzung verursachte Umweltauswirkungen (basierend auf [FCHH12, VDI4800])

2.1 Weltweite Rohstoffsituation

Der weltweite Verbrauch von Rohstoffen hat, wie in Abbildung 7 dargestellt, gerade in den letzten Jahren stark zugenommen [www1]. Während der Rohstoffverbrauch in den stärker industrialisierten Regionen in dem angegebenen Zeitraum — abgesehen von zwischenzeitlichen Schwankungen — relativ stabil gebliebenen ist, hat dieser in den weniger entwickelten Regionen stark zugenommen. Der Anstieg des weltweiten Verbrauchs an Rohstoffen hat zwei wesentliche Ursachen. Zum einen tritt in den weniger entwickelten Regionen ein starkes Bevölkerungswachstum auf, welches laut Prognosen auch in Zukunft anhält (siehe Abbildung 8) [UN15a, UN15b].

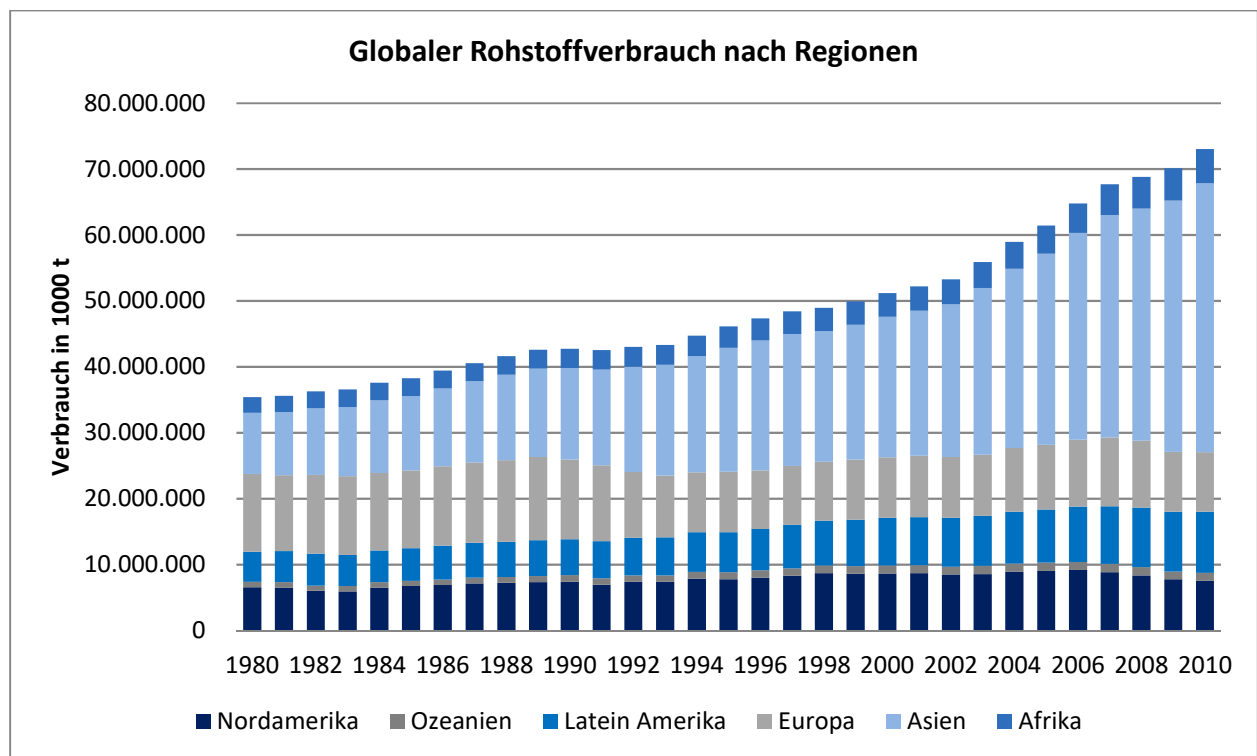


Abbildung 7: Globaler Rohstoffverbrauch nach Regionen (basierend auf Daten von [www1])

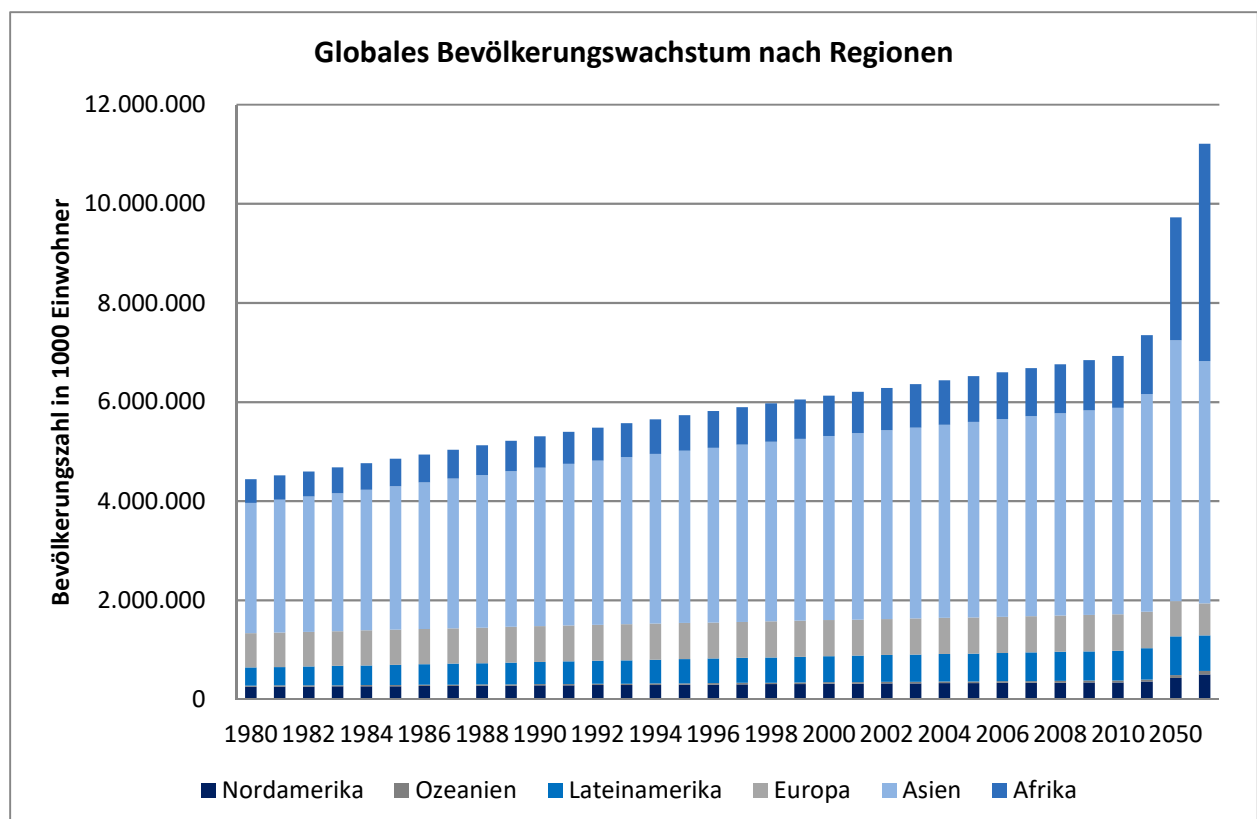


Abbildung 8: Globales Bevölkerungswachstum nach Regionen (basierend auf Daten von [UN15a, UN15b])

Darüber hinaus bewegte sich der Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch in diesen Regionen im Verhältnis zu den stärker entwickelten Regionen bis 1980 auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Seit den 80er Jahren steigt jedoch der Pro-Kopf-Rohstoffverbrauch in den weniger entwickelten Gebieten stark an (siehe Abbildung 7) [Ditt12]. Aufgrund dieser Faktoren, hat sich die weltweite Rohstoffentnahme seit dem Jahr 1980 nahezu verdoppelt (siehe Abbildung 9) [KGEE09].

Der Verbrauch, respektive die Förderung von Rohstoffen hat neben den daraus resultierenden Umweltauswirkungen auch soziale und politische Auswirkungen. Der Abbau von einigen Rohstoffen findet in Ländern statt, in denen es ein erhöhtes Konfliktpotenzial gibt, bspw. die Cobalt-Förderung im Kongo [AsBC16].

Seit dem Jahr 1990 steht die Förderung von Rohstoffen laut United Nations Development Group in Zusammenhang mit mindestens 17 gewalttätigen Konflikten. Schätzungen zufolge werden etwa 40% aller innerstaatlichen Konflikte in den letzten 60 Jahren mit dem Abbau von natürlichen Ressourcen in Verbindung gebracht. [UNDG13]

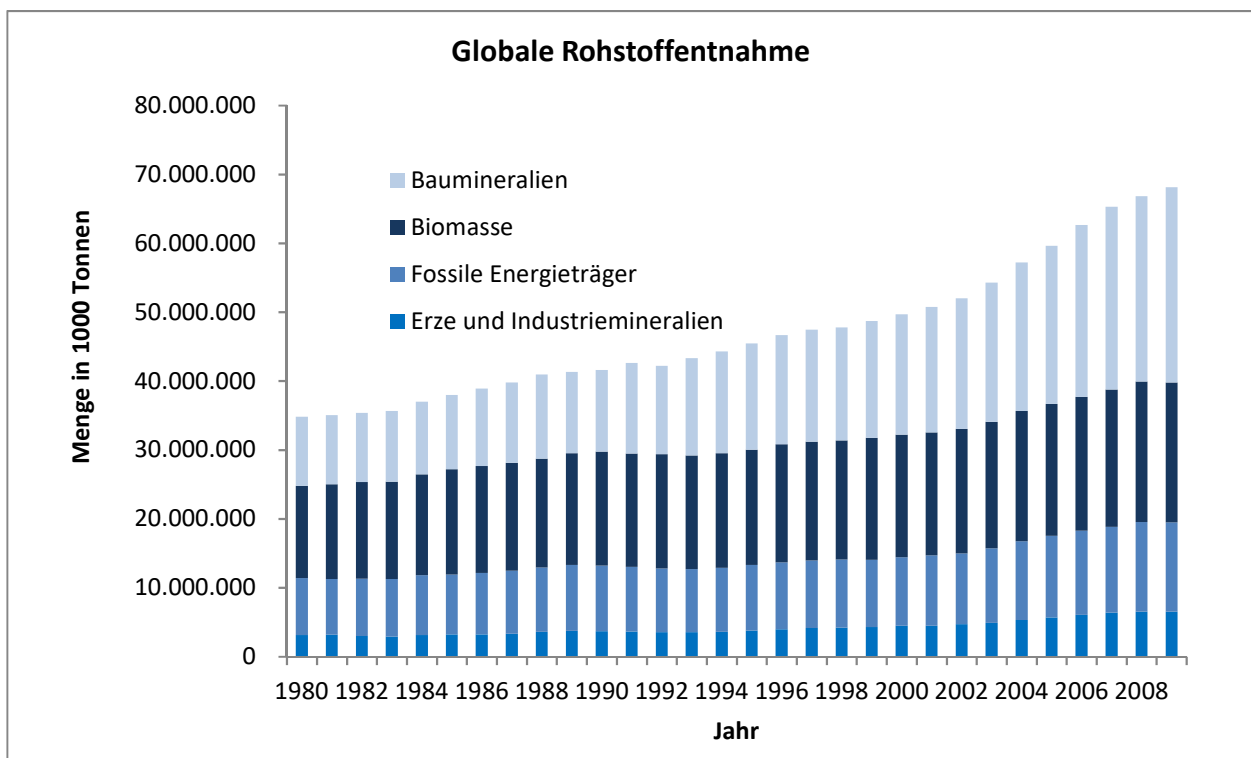


Abbildung 9: Globale Rohstoffentnahme (basierend auf Daten von [KGEE09])

Da viele Industrieländer wie Deutschland nur sehr wenige eigene Rohstoffvorkommen aufweisen oder sich der lokale Abbau oft wirtschaftlich nicht lohnt wird der Rohstoffkonsum zum Teil durch Importe aus Entwicklungs- und Schwellenländern gedeckt [Ditt12, Huy13].

Dort bestimmen oftmals prekäre Arbeitsverhältnisse den Alltag der Arbeitnehmer. Die Standards für Gesundheitsversorgung und Arbeitssicherheit sowie das Lohnniveau liegen weit unter denen von Industrienationen. [ILO12]

Neben den prekären Arbeitsbedingungen und den Umweltauswirkungen durch die Förderung und Nutzung von Rohstoffen ist die Gesamtmenge an Rohstoffen, die die Erde vorhält, limitiert. Dabei wird zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Rohstoffen unterschieden. Während erneuerbare Rohstoffe sich nach einer gewissen Zeit regenerieren, erneuern sich nicht erneuerbare Rohstoffe nicht innerhalb menschlicher Zeithorizonte [Mild2010].

Eine Reduzierung des Rohstoffverbrauchs ist somit zwingend notwendig, damit nachfolgende Generationen ebenfalls Zugriff auf Rohstoffe haben. In Tabelle 2 sind basierend auf [USGS16] beispielhaft die jährliche Minenproduktion, die Reserven und die Substituierbarkeit für einige Metalle angegeben.

Metall	Rohstoff	Jährliche Produktion in 2015 [1000 to]	Reserven [1000 to]	Mögliche Substitution
Chrom	Chromit	27.000	> 480.000	nicht ersetzbar
Aluminium	Bauxit	274.000	28.000.000	ersetzbar
Kupfer	Kupfererz	18.700	720.000	ersetzbar
Zink	Zinkerz	13.400	200.000	ersetzbar

Tabelle 2: Jährliche Produktion und Reserven ausgewählter Metalle (basierend auf Daten von [USGS16])

Die Angaben zu den Rohstoffreserven sind keine absoluten Werte, da immer wieder neue Vorkommen entdeckt und erschlossen werden [USGS16]. Teilweise können Materialien auch durch andere substituiert werden [USGS16]. Nichtsdestotrotz ist die Notwendigkeit zur Reduzierung des Rohstoffverbrauchs aufgrund der Endlichkeit der globalen Vorräte ersichtlich. Durch das weltweite Wachstum von Entwicklungs- und Schwellenländern gibt es deshalb Bemühungen, den Ressourcenverbrauch von dem ungehinderten wirtschaftlichen Wachstum zu entkoppeln [UNEP12].

Ein weiteres Problem bei der Rohstoffversorgung für Industrieländern ist die Versorgungssicherheit. Die Industrie ist abhängig von vielen Rohstoffen, weshalb Versorgungsschwankungen oder -unterbrechungen kritisch sind. [Huy13]

2.2 Weltweite Energiesituation

Seit dem neuen Jahrtausend beschäftigt vor allem die Energiewende die Politik und Gesellschaft in Deutschland. Im Vordergrund steht hierbei die Energieversorgung mit den draus resultierenden Treibhausgasemissionen und deren negativer Einfluss auf das Klima. Ziel ist es unter anderem, den Anteil der erneuerbaren Energien am Brutto-Endenergieverbrauch bis 2050 auf 60 % zu steigern. [BMWi10]

Dadurch werden folglich weniger fossile Energieträger benötigt. Dadurch sollen einerseits der Ausstoß an Emissionen verringert und andererseits der Anteil einiger nicht erneuerbarer Ressourcen, und damit auch die Importabhängigkeit von diversen Rohstoffen, reduziert werden [BMWi15].

Trotz der Umstellung einiger OECD-Mitgliedsstaaten auf erneuerbare Energien stagniert der Gesamtprimärenergieverbrauch der OECD nach Hochrechnungen weiterhin. Auch in den kommenden Jahren ist vorerst keine Abnahme zu erkennen. [www2]

In den weniger entwickelten Ländern steigt dagegen der Gesamtprimärenergieverbrauch stärker an als der Verbrauch von erneuerbaren Energien, sodass die Differenz stetig größer wird. Um diese Lücke zu schließen, werden schließlich mehr fossile Energieträger benötigt. Im Gegensatz zu den OECD-Staaten steigt hier somit der jährliche Verbrauch an fossilen Energieträgern in den nächsten Jahren. [www2]

Dieser Anstieg lässt sich einerseits durch den durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch in den weniger entwickelten Ländern erklären. Dieser ist im Vergleich zu den entwickelten Ländern deutlich geringer, wächst aber in den letzten Jahren langsam an [BMWi16]. Andererseits findet gerade in diesen Ländern ein sehr starkes Bevölkerungswachstum statt (Abbildung 8). Durch die Kombination eines steigenden Pro-Kopf-Energieverbrauchs und einer wachsenden Bevölkerung nimmt der Gesamtprimärenergieverbrauch in den weniger entwickelten Ländern stark zu. Diese Entwicklung verursacht logischerweise eine Steigerung der Förderung von fossilen Energieträgern, wie sie auch aus den Daten von [KGEE09] ersichtlich ist (siehe Abbildung 9).

Der Primärenergieverbrauch von konventionellen Energieträgern hat erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt. Die Entnahme aus der Natur birgt große Risiken und verursacht erhebliche Schäden. Die Weiterverarbeitung sowie die anschließende Nutzung – Verbrennung – bewirken hohe Emissionen an Treibhausgasen wie Kohlenstoffdioxid und anderen toxischen Stoffen. [FCHH12]

Bei einem stark steigenden Anteil an erneuerbaren Energien, wie es in einigen Industrieländern der Fall ist, nimmt die Bedeutung des Primärenergieverbrauchs für die Umweltauswirkungen in

Zukunft jedoch ab. Teilweise wird aber auch eine Verlagerung der Umweltauswirkungen in andere Bereiche in Kauf genommen. Somit rückt der Fokus hier eher in Richtung der übrigen nicht erneuerbaren Ressourcen, die in die Realisierung von Produkten, Waren und Dienstleistungen fließen.

Konventionelle Umweltbewertungsmethoden von Produkten, die ausschließlich den Energieverbrauch und die daraus entstehenden CO₂-Emissionen bilanzieren, könnten in Zukunft an Bedeutung verlieren, da die Umweltauswirkungen der Energieversorgung durch erneuerbare Energien sinken. Die Korrelation zwischen Energieverbrauch und Kohlenstoffdioxidemissionen wird durch diesen Prozess schwächer. Dieser Umstand gilt jedoch nicht für Länder, in denen die Deckung des Primärenergieverbrauchs durch konventionelle fossile Energieträger weiterhin steigt. In solchen Fällen bleiben der Energieverbrauch und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen wichtige Aspekte bei der Produktentstehung, die beachtet werden müssen.

3 Grundlagen

In Kapitel 3.1 werden zunächst alle für diese Arbeit relevanten Begriffe definiert, um einen besseren Überblick über das Themengebiet zu erhalten. Im Anschluss werden in Kapitel 3.2 die Grundlagen der beiden klassischen Fachbereiche Produkt- und Produktionssystementwicklung im Kontext der Produktentstehung betrachtet. Alle anderen Themenbereiche, wie die Materialauswahl, die eigentlich zur Produktentwicklung gehört, hier aber als eigenständiger Fachbereich aufgeführt wird, Vorgehensweisen, die die klassischen Fachbereiche besser verzahnen sollen (integrierte Ansätze), einzelne Bausteine (z.B. die Auswahl von Produktionsverfahren) sowie Bewertungsverfahren für eine integrierte Definition werden in Kapitel 4 (Stand der Technik) vorgestellt.

3.1 Begriffsdefinitionen

Im Rahmen der Produktentstehung existiert eine Vielzahl von Begriffen, die es zunächst für diese Arbeit zu ordnen gilt.

In der Fachliteratur sind oft mehrere, teilweise auch unterschiedliche Definitionen nachzulesen, von denen nur die für diese Arbeit relevanten Definitionen erläutert werden. Des Weiteren existieren für ähnliche Tätigkeiten oftmals unterschiedliche Begriffe, die die Übersichtlichkeit negativ beeinflussen. In diesem Kapitel nicht aufgeführte, für die Arbeit dennoch relevante Begriffe können im Glossar nachgelesen werden.

Abbildung 10 stellt eine Übersicht dar und ordnet die unterschiedlichen Begriffe im Kontext von Produkt, Material und Produktionssystem nach dem Verständnis in dieser Arbeit. Dabei soll noch einmal hervorgehoben werden, dass auch eine abweichende Anordnung der Begriffe möglich ist.

Die **Produktentstehung** ist nach Ehrlenspiel die Gesamtheit aller Prozesse, die notwendig sind, um ein Produkt ausgehend von der Produktplanung bis hin zur Produktnutzung zu realisieren [Ehr09]. Der übergeordnete Vorgang, um neue Produkte zu erstellen, ist folglich die Produktentstehung (Synonym: Produkterstellung). Dazu gehört maßgeblich die Festlegung des erforderlichen Produkts, Produktionssystems und der Materialien innerhalb der jeweiligen Fachbereiche.

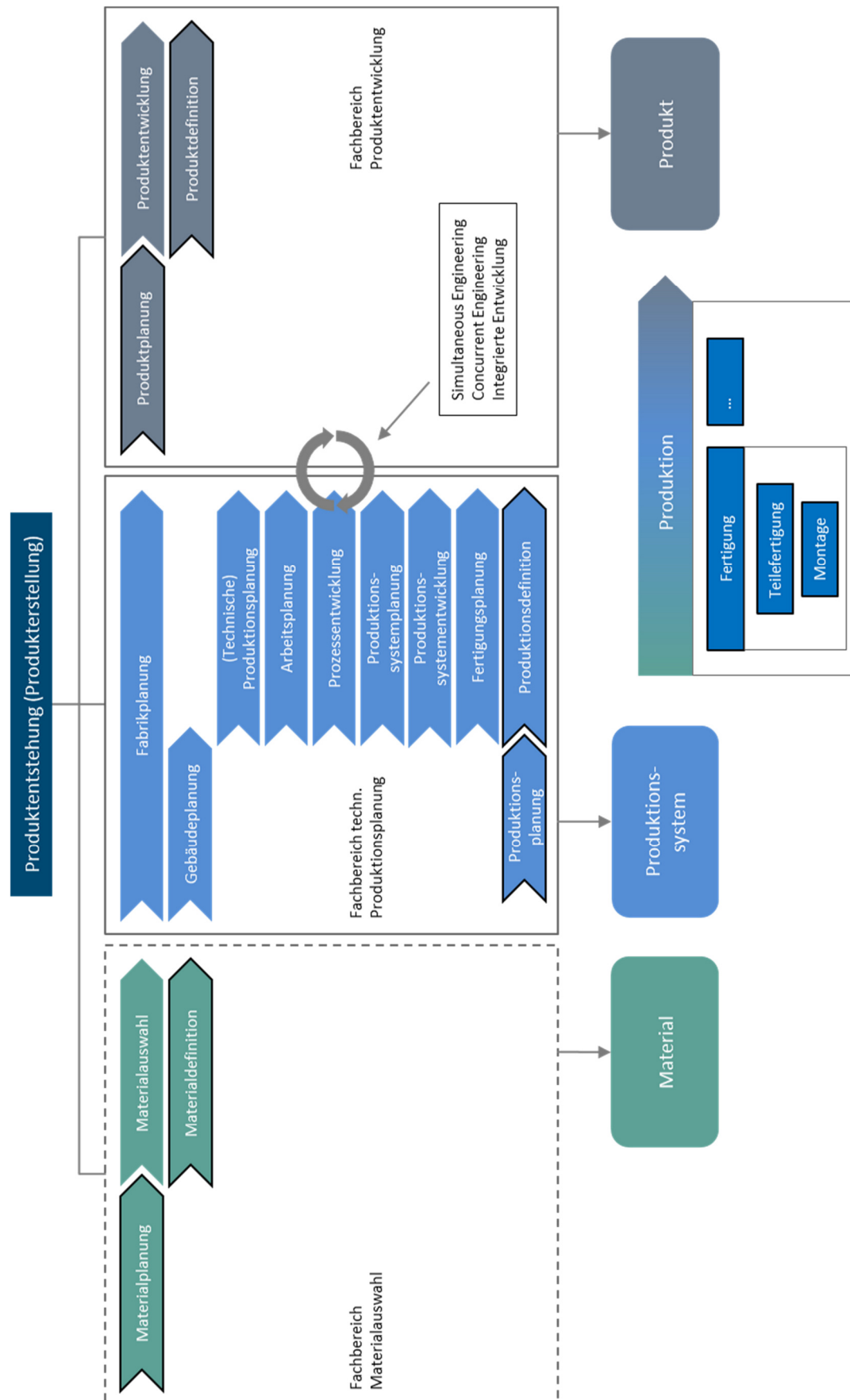


Abbildung 10: Übersicht der Begrifflichkeiten im Zusammenspiel von Produkt, Material und Produktionssystem nach dem Verständnis dieser Arbeit

Ansätze des Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering oder der integrierten Produktentwicklung sollen die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem besser verzahnen. In der Produktion stellt das Produktionssystem aus den Materialien schließlich das Produkt her.

Die VDI-Richtlinie 2221 definiert ein **Produkt** als „Erzeugnis, das als Ergebnis des Entwickelns und Konstruierens hergestellt oder angewendet wird“ [VDI 2221].

In [REFA90] werden komplexe **Produktionssysteme** als „[...] Produktionseinrichtungen, bei denen mehrere sich ergänzende Einzelfunktionen, sowohl bei der Bearbeitung und Montage als auch Material- und Informationsfluss, weitgehend selbsttätig ablaufen“ [REFA90] definiert. Dazu zählen sowohl automatisierte als auch semi-automatisierte Systeme [REFA90].

Nach Jäger [Jäge90] tragen die beiden Sub-Systeme Bearbeitung (Fertigung) und Montage zur unmittelbaren Produktion bei. Darunter werden alle direkt an der Produktion beteiligten Anlagen/Betriebsmittel zusammengefasst [Jäge90].

Im Rahmen dieser Arbeit werden mit dem Begriff **Produktionssystem** die Anlagen bzw. Komponenten oder Betriebsmittel und Prozesse zur Herstellung zusammengefasst.

Der Begriff **Produktionssystem** kann auch als eine Managementstrategie für die Produktion verstanden werden [BoDG13].

Material ist ein Sammelbegriff für ein „Stoff oder Stoffgemisch, der oder das für die Herstellung von Produkten bestimmt ist. Dies umfasst sowohl Rohstoffe als auch höher verarbeitete Stoffe und Stoffgemische“ [KKHG12]. In dieser Arbeit wird der Begriff **Material** jedoch aufgrund der angelsächsischen Definition als Äquivalent für Werkstoff verwendet.

Nach Ondracek wird ein Material zum **Werkstoff**, „[...] wenn sein fester Aggregatzustand technisch verwertbare Eigenschaften besitzt [und] es technologisch und wirtschaftlich machbar ist“ [Ondr79].

Der Begriff **Produktion** (engl. Manufacturing Production, Abk.: Production) leitet sich aus dem lateinischen Wort „producere“ (etwas hervorbringen bzw. erzeugen) ab und bedeutet die physische Herstellung von Produkten aus ihren Materialbestandteilen [CIRP90]. Jackstien und Vajna

erweitern diese Definition und sehen die Produktion als „Phase der Materialisierung des in der Produktentwicklung entstandenen Produkts anhand seiner Dokumente zu Herstellung, Nutzung und Verwertung“ [JaVa14]. Sie beinhaltet die Fertigungssteuerung, Materialwirtschaft, Fertigung, Logistik und Distribution [JaVa14].

Die **Fertigung (Herstellung)** umfasst nach Hachtel und Holzbaur den „[...] unmittelbaren Herstellungsprozess mit Teilefertigung und Montage“ [HaHo10]. **Fertigung** wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch als Synonym für die Teilefertigung verwendet (siehe Kapitel 1.2.1).

3.1.1 Begriffe aus dem Umfeld der Produktentwicklung

Die **Produktplanung** „[...] dient zur Gestaltung des Angebots eines Unternehmens abhängig von den Zielmärkten und den dort erzielbaren Rentabilitäten und Marktführerschaften. Sie besteht aus den Phasen Forschung, Erstellen des Produktportfolios und Marketing“ [JaVa14].

Die **Produktentwicklung** stellt neben verschiedenen anderen Phasen die essentielle Phase einer Produktentstehung dar [Ehrl09]. Sie beschreibt alle Tätigkeiten, die ausgehend von der Aufgabenstellung zur Fertigstellung der Produktdokumentation führen [VDI2221]. Ulrich und Eppinger erweitern diesen Umfang und definieren die Produktentwicklung als Summe aller Aktivitäten, die nötig sind, um ein Produkt ausgehend von der Marktanalyse an den Kunden zu liefern [UIEp08]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff **Produktdefinition** im Sinne einer einheitlichen Beschreibung als Synonym zu Produktentwicklung verwendet.

3.1.2 Begriffe aus dem Umfeld der Entwicklung von Produktionssystemen

Die **Fabrikplanung** ist nach der VDI-Richtlinie 5200 ein „Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI5200].

Meierlohr unterteilt die Fabrikplanung in die Bereiche Produktionsplanung und Gebäudeplanung. Die Planungsaktivitäten in der Produktionsplanung umfassen beispielsweise die Logistik, den Materialfluss, die Betriebsmittel und das Layout. Die Gebäudeplanung verfolgt die Gebäude als solche, die Medienversorgung, die Kommunikation usw. als Planungsziele. [Meie03]

Die **Technische Produktionsplanung** beschreibt die einmaligen planerischen Maßnahmen, „[...] die das räumliche und zeitliche Zusammenwirken von Mensch und Betriebs- bzw. Arbeitsmittel

unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen zur Herstellung von Serienerzeugnissen vorbereiten und sicherstellen“ [Zenn06]. Spur et al. gliedert die Aktivitäten der (technischen) Produktionsplanung in eine Produktionssystemplanung, -auslegung und -erprobung [Spur94].

Die **Arbeitsplanung** umfasst nach Eversheim „[...] alle einmaligen auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses sichern“ [Ever02].

Der Begriff **Prozessentwicklung** umfasst nach Bossmann „[...] die Ausarbeitung der Fertigungsplanung und den Serienanlauf der Produktion. Ziel der **Fertigungsplanung** ist die Bestimmung der Arbeitsanweisungen und die Auswahl der Fertigungsmittel“ [Boss07]. Bossmann verwendet den Begriff als Synonym zur technischen Produktionsplanung [Boss07].

Der Begriff **Prozessentwicklung** hat in der Verfahrenstechnik eine andere Bedeutung und beschreibt die Tätigkeiten um ein neues Verfahren bzw. einen neuen Prozess zu entwickeln.

Müller verwendet die Begriffe **Produktionssystemplanung** und **Produktionsplanung** als Synonyme und definiert sie als „[...] die Tätigkeiten zur Gestaltung eines Produktionssystems [...]“ [Müll08].

In dieser Arbeit wird der Begriff **Produktionsplanung** jedoch analog zur Produktplanung für eine vorgelagerte Planungsphase verwendet, in der Wettbewerber, die Märkte sowie verfügbare Technologien analysiert werden.

Nach Cochran deckt die **Produktionssystementwicklung** alle Aspekte von der Erstellung bis hin zum Betrieb von Produktionssystemen ab. Die Erstellung beinhaltet dabei die Auswahl der Komponenten, die Anordnung der Komponenten, die Gestaltung der Arbeitsabläufe, die Entwicklung des Material- und Informationsflusses usw. [CADL01]

Die **Produktionsdefinition** umfasst alle Aktivitäten ausgehend von den Spezifikationen an das Produktionssystem bis hin zur Dokumentation der verschiedenen Anlagen und Prozesse. Dabei stehen vor allem die technischen Aspekte Prozess und Anlage und deren Entwicklung im Fokus der Betrachtungen.

3.1.3 Begriffe aus dem Umfeld der Materialauswahl

Die **Materialauswahl** ist der Sammelbegriff für die Tätigkeiten die erforderlich sind um ausgehend von den Anforderungen an das Material und der Identifikation der notwendigen Eigenschaften, die für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Materialien zu definieren [Ashb05]. In dieser Arbeit wird der Begriff **Materialdefinition** als Synonym zu Materialauswahl verwendet.

Materialplanung wird in dieser Arbeit als eine der Materialauswahl vorangestellte Planungsphase verstanden, in der Wettbewerber, die Märkte sowie verfügbare Technologien analysiert werden.

3.1.4 Begriffe aus dem Umfeld der integrierten Entwicklung

Vajna und Burchardt verstehen unter der **Integrierten Produktentwicklung** „Die integrierte Anwendung von ganzheitlichen und multidisziplinären Methoden, Verfahren, Organisationsformen sowie manueller und rechnerunterstützter Werkzeuge unter minimierter und nachhaltiger Nutzung von Produktionsfaktoren und Ressourcen. Die IPE umfasst alle Schritte von der Idee bis zur Serienfreigabe/Markteinführung eines Produktes oder einer Dienstleistung“ [VaBu14].

Eversheim definiert den Begriff **Simultaneous Engineering** als „[...] die integrierte und zeitlich parallele Produkt- und Prozessgestaltung mit dem Ziel die Time-to-Market zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu reduzieren und die Produktqualität im umfassenden Sinn zu verbessern“ [EvSA05].

Nach Winner et al. ist **Concurrent Engineering** eine systematische Vorgehensweise zur integrierten, gleichzeitigen Entwicklung von Produkten und den damit einhergehenden Prozessen wie Herstellung und Support. Der Entwickler berücksichtigt dabei alle Phasen des Produktlebenszyklus – von der Konzeption bis hin zur Entsorgung und Aspekte wie Qualität, Kosten, Zeitplan und Nutzeranforderungen. [WPBS88]

Die beiden Begriffe **Simultaneous Engineering** und **Concurrent Engineering** werden oft als Synonyme verwendet [ZhZh95, Ehrl09], wie auch in dieser Arbeit.

Integrierte Produkt-, Produktions- und Materialdefinition bedeutet in dieser Arbeit die übergreifende Entwicklung des Produkts, des dazugehörigen Produktionssystems und der eingesetzten Materialien, in der die Merkmale der drei Systeme gemeinsam festgelegt werden.

Als Zwischenfazit lässt sich zusammenfassen, dass gerade für die Tätigkeiten der Produktionsdefinition verschiedene Begriffe existieren, die jedoch in der Regel eine ähnliche Bedeutung haben. Der Umfang und die Hierarchie weichen je nach Quelle ab.

3.2 Produktentstehung

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der beiden klassischen Fachbereiche Produkt- und Produktionssystementwicklung dargestellt. In dieser Arbeit werden diese um einen zusätzlichen Fachbereich, die Materialauswahl, die normalerweise innerhalb der Produktentwicklung stattfindet, erweitert. Sowohl die Materialauswahl als auch die integrierten Ansätze, die auf den Grundlagen aufbauen, werden im Stand der Technik in Kapitel 4 vorgestellt.

Abbildung 11 zeigt die elementaren Phasen der Produktentstehung im Rahmen des Produktlebenszyklus. Ausgehend von der Produktplanung startet parallel bzw. leicht zeitlich versetzt im Sinne des Simultaneous/Concurrent Engineering die Produktionsplanung [Ehr109, WPBS88]. Je nach Ausgangssituation wäre auch eine der Produktionsplanung zeitlich nachgelagerte Produktplanung denkbar. So könnte zum Beispiel für die Produktionssysteme in einem aus strategischen Gründen neu geplanten Werk ein Produkt entwickelt bzw. angepasst werden.

In der Planungsphase sowohl von Produkt als auch Produktion finden Markt-, Wettbewerbs-, Technologie-, Patent- und Produktanalysen statt. In der eigentlichen Entwicklung von Produkt und Produktionssystem werden alle relevanten Merkmale festgelegt, die den Anforderungen aus der vorangegangenen Planungsphase genügen müssen. Sobald das Produkt in der spezifizierten Dokumentation vorliegt und das Produktionssystem realisiert wurde, kann die Produktion gestartet werden (SOP). Zur Realisierung der Produkte aus den Materialbestandteilen sind schließlich die Materialbereitstellungsphase und die Produktionsphase notwendig.

Sowohl Eigner und Stelzer als auch Weyand ordnen die Phase der Produktion — anders als in dieser Arbeit — nicht mehr dem Produktentstehungsprozess zu, sondern sehen sie als nachgelagert an [EiSt08, Weya10].

In den folgenden Unterkapiteln werden wichtige in der Wissenschaft anerkannte Vorgehensweisen für die beiden klassischen Fachbereiche Produkt- und Produktionssystementwicklung vorgestellt. Dabei wird der Fokus stärker auf die Entwicklung von Produktionssystemen gelegt, da dieses Themengebiet weniger klar strukturiert ist und eine bessere Übersicht das Verständnis des Themas erleichtert.

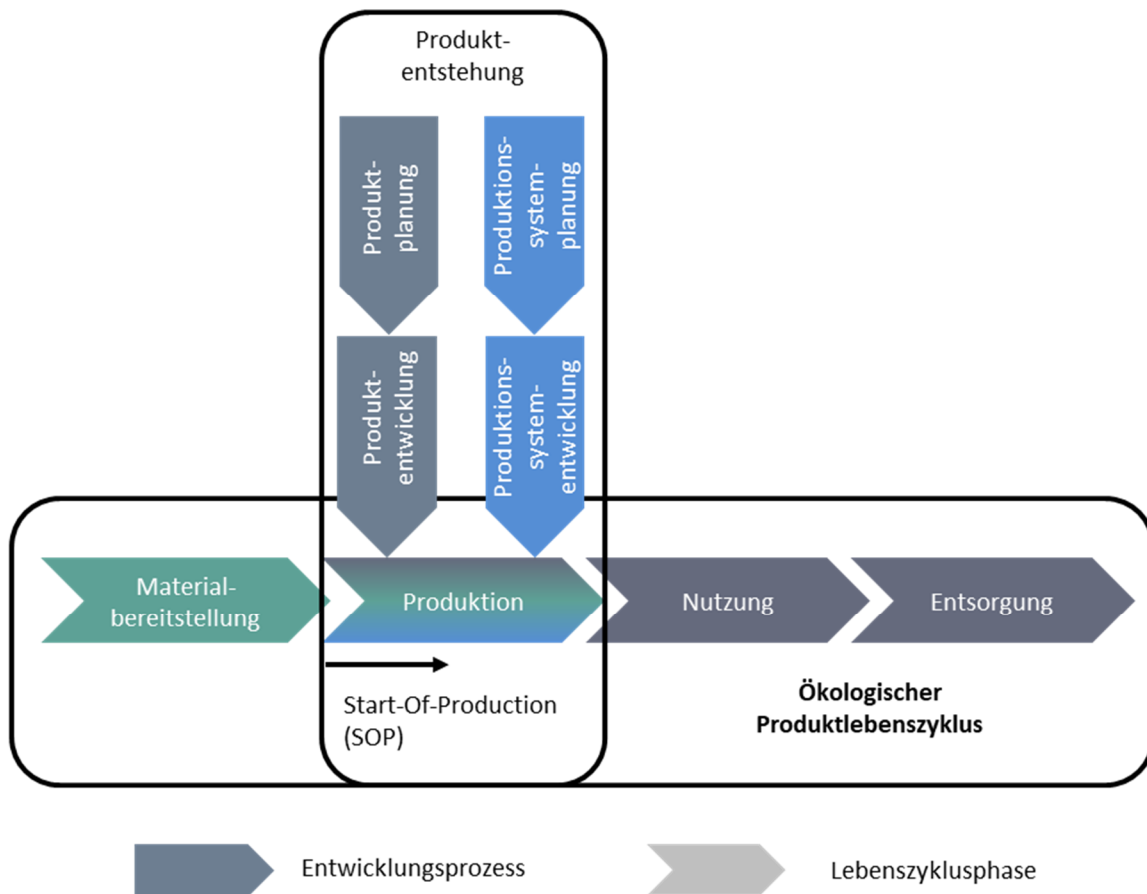


Abbildung 11: Produktentstehungsprozess (in Anlehnung an [Viel05])

3.2.1 Produktentwicklung

Die Produktentwicklung hat einen wesentlichen Einfluss auf die ökologische, technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines Produktes und somit auch auf den Erfolg des Unternehmens. Aus diesem Grund entstanden eine Vielzahl verschiedener Ansätze und Vorgehensweisen mit dem Ziel, diesen Prozess möglichst effizient und effektiv handzuhaben.

In der vorliegenden Arbeit wird repräsentativ eine Auswahl etablierter Ansätze vorgestellt, die für die weitere Ausarbeitung besonders relevant erscheinen:

- VDI-Richtlinie 2221
- Produktentwicklung nach Ulrich und Eppinger
- Quality Function Deployment (QFD) nach Akao
- Axiomatic Design nach Suh
- CPM/PDD-Ansatz nach Weber

Im Anschluss daran erfolgt eine Zusammenfassung und Ordnung der Ansätze.

VDI-Richtlinie 2221

Die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] beschreibt ein allgemeines Vorgehen zur Entwicklung von technischen Systemen und Produkten.

Der in Abbildung 12 dargestellte Prozess beginnt mit der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung mit dem Ziel, die Berücksichtigung aller Anforderungen des Kunden (bzw. anderer Stakeholder) zu gewährleisten. Daraus resultiert eine vollständige Spezifikation des Produktes. [VDI2221]

Auf Grundlage dieser Analyse kann die Entwicklung einer Funktionsstruktur durchgeführt werden. Das Ergebnis ist eine Struktur aller Funktionen, die das Produkt erfüllen muss, um den Anforderungen zu genügen. Im Anschluss erfolgt die Zuordnung von Lösungsprinzipien, welche die aufgestellten Funktionen erfüllen können. Ein fertiges Konzept stellt schließlich das Ergebnis dieser zwei Phasen dar. [VDI2221]

Im darauffolgenden Schritt wird das gewählte Konzept in verschiedene Komponenten/Module zerlegt, die daraufhin ausgestaltet werden. Die finalen Komponenten stehen am Ende dieser Phase fest. Anschließend erfolgt die Integration aller Komponenten zu einem Gesamtsystem. Die nachgelagerte Produktdokumentationsphase erfasst alle für die Fertigung und Nutzung erforderlichen Angaben und bündelt sie in der Produktdokumentation. [VDI2221]

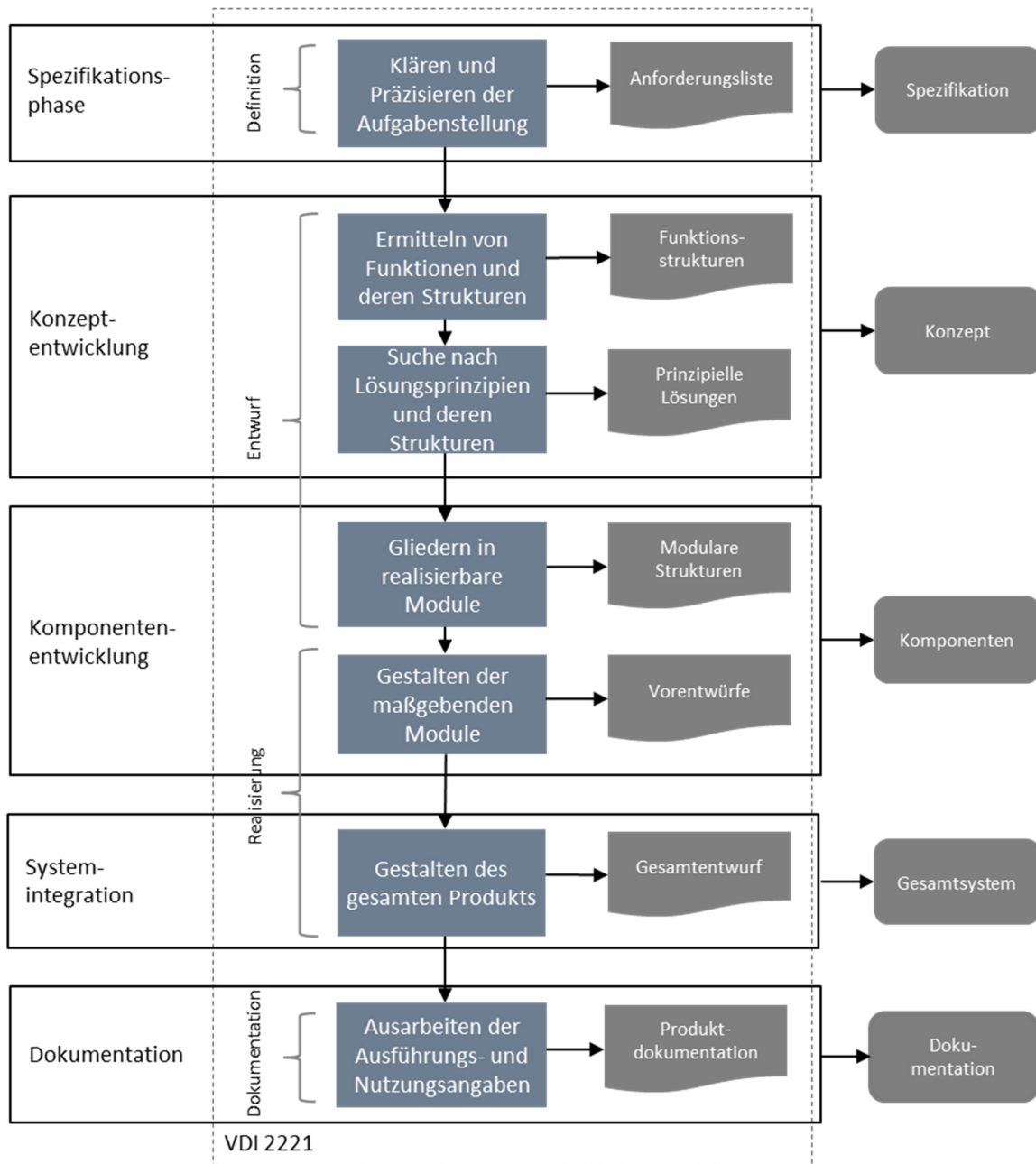


Abbildung 12: VDI-Richtlinie 2221 zur Entwicklung und Konstruktion technischer Systeme und Produkte (in Anlehnung an [VDI2221])

Produktentwicklung nach Ulrich und Eppinger

Ulrich und Eppinger [UIEp08] beschreiben ein weiteres Vorgehen zur Entwicklung von Produkten. In Abbildung 13 ist die allgemeine Struktur dargestellt.

Der Entwicklungsprozess beginnt mit einer Planungsphase, in der beispielsweise Unternehmensziele, Märkte und Randbedingungen festgelegt werden. In der anschließenden Komponententwicklung erfolgt die Analyse der Marktbedürfnisse und die Entwicklung und Evaluierung alternativer Konzepte. Ein Konzept besteht in [UIEp08] aus der Form, Funktionen und Merkmalen. In der anschließenden Systementwicklung wird neben der Produktarchitektur ein vorläufiger Prozessplan für die ausgewählten Konzepte erstellt. Die Produktarchitektur beinhaltet ein geometrisches Layout und die Aufteilung in Subsysteme. [UIEp08]

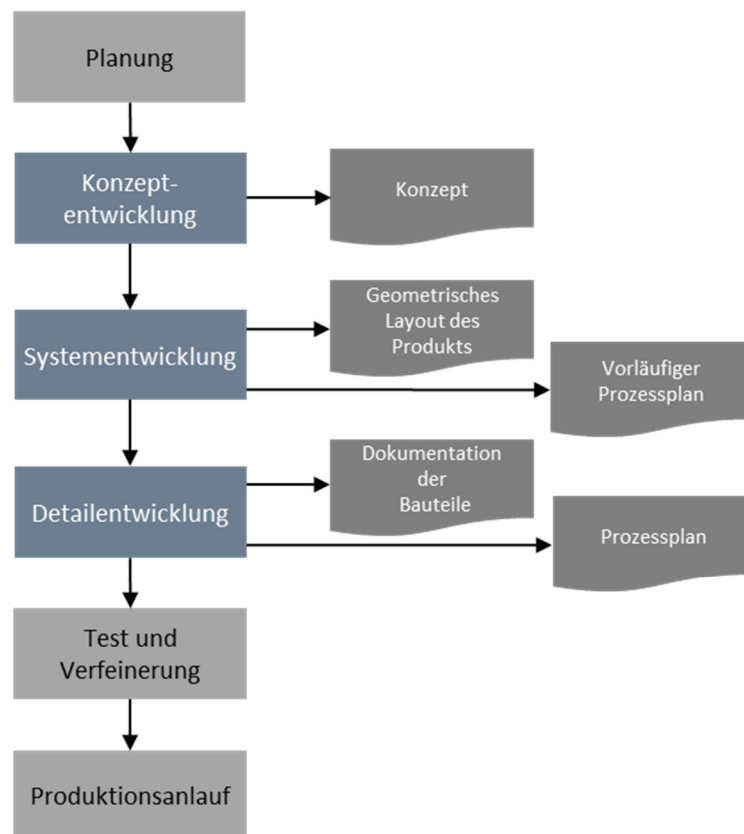


Abbildung 13: Allgemeiner Produktentwicklungsprozess nach Ulrich und Eppinger (in Anlehnung an [UIEp08])

Die darauffolgende Detailentwicklung erarbeitet die vollständige Spezifizierung der Geometrie, der Materialien und Toleranzen aller Bauteile, welche in den Fertigungsunterlagen festgehalten sind. Außerdem wird der Prozessplan vervollständigt und die erforderlichen Werkzeuge gestaltet. [UIEp08]

Abschließend erfolgen eine Evaluierung und Verbesserung der Ergebnisse mit dem Ziel, sie auf die Produktion hin anzupassen bevor der Produktionsanlauf beginnt [UIEp08].

Quality Function Deployment (QFD) nach Akao / Hauser und Clausing

Um den Entwicklungsprozess von Produkten effizienter und effektiver zu gestalten und gleichzeitig auch eine Dokumentation der Lösungsfindung zu erstellen, stehen dem Entwickler verschiedene Methoden zur Verfügung.

Das von Akao [Akao90] entwickelte Quality Function Deployment (QFD) unterstützt das sequentielle aufeinander aufbauende Aufstellen der wesentlichen Funktionen, Produktmerkmale, Prozessmerkmale und Produktionsanforderungen (siehe Abbildung 14). Durch den Einsatz eines House of Quality können die Anforderungen an das Produkt in relevante Produktfunktionen übersetzt werden. Die Funktionen stehen über eine Bewertungsmatrix mit den Anforderungen in Relation. Dadurch können die Funktionen mit dem größten Einfluss auf die Anforderungen identifiziert werden. [Akao90, HaCl88]

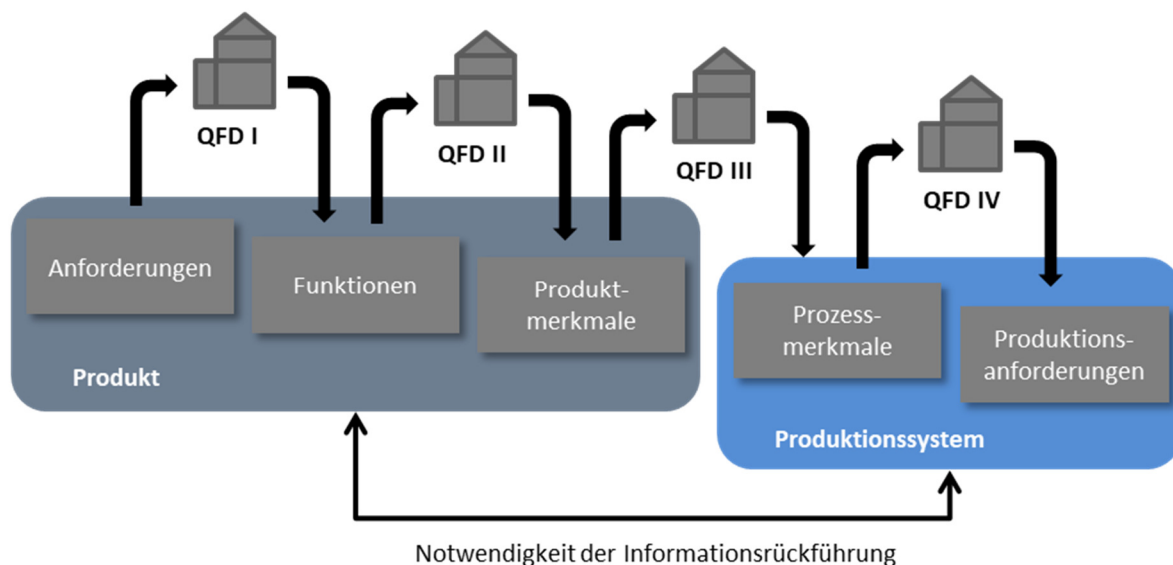


Abbildung 14: Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses durch Quality Function Deployment (QFD) von [Akao90] (basierend auf [HaCl88, StVi15])

Dieses Vorgehen wird wiederholt, um schließlich über die Produktmerkmale zu den erforderlichen Prozessmerkmalen und den daraus resultierenden Produktionsanforderungen zu gelangen [HaCl88].

Auch wenn mit dieser Vorgehensweise Herstellungsaspekte adressiert werden können, ist sie stark sequentiell geprägt und erlaubt keine Rückmeldung von Informationen aus dem Bereich

der Produktion zurück in den produktbeeinflussenden Bereich. Beim Aufstellen der Lösungen erfolgt eine Bewertung der Abhängigkeiten der beteiligten Elemente und damit eine Gewichtung, je nach Einfluss auf die Erfüllung der Kundenanforderungen. Die Lösungen werden jedoch nicht nach ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet. Eine solche Erweiterung wäre jedoch durchaus denkbar.

Axiomatic Design nach Suh

Suh [Suh90] beschreibt in seinem Axiomatic-Design-Ansatz das Gestalten von Produkten als das Zuordnen von Elementen aus der funktionalen Domäne zu Elementen der physischen Domäne. Die Prozessgestaltung wird über eine weitere Verknüpfung mit der Prozessdomäne in diese Betrachtungen integriert [Suh90].

Die allgemeine Struktur ist in Abbildung 15 dargestellt. Zur Erfüllung der Kundenwünsche werden zunächst geeignete Funktionen {FRs} (z.B. Drehmoment wandeln) aufgestellt. Im nächsten Schritt erfolgt die Auswahl entsprechender Design-Parameter {DPs} (z.B. Zahnräder mit Evolventenverzahnung), die die Funktionen erfüllen. Abschließend werden spezielle Prozessvariablen {PVs} (z.B. Schnittgeschwindigkeit) festgelegt, die die vorher bestimmten Design-Parameter realisieren können. Diese drei zentralen Elemente werden durch Vektoren {} repräsentiert. Benachbarte Vektoren stehen über spezielle Matrizen ([A] und [B]) zueinander in Relation. [Suh90]

Suh stellt in [Suh90] schließlich folgende Gestaltungs-Gleichung auf:

$$\{FR\} = [A] \cdot \{DP\}; \{DP\} = [B] \cdot \{PV\} \text{ [Suh90]}$$

Eine Umstellung der Gleichung (Matrix A wird invertiert) ist erforderlich, um die Design-Parameter, basierend auf den funktionalen Anforderungen zu bestimmen. Dabei müssen die Zusammenhänge linearer Natur sein, um sie in Matrix-Darstellung abzubilden. Suh definiert zwei Axiome die bei einer guten Konstruktion berücksichtigt werden müssen: das Unabhängigkeits-Axiom und das Informations-Axiom. [Suh90]

Das Unabhängigkeits-Axiom verlangt, dass die funktionalen Anforderungen unabhängig voneinander sein sollen. Das Informations-Axiom hingegen fordert eine Minimierung des Informationsgehalts und definiert die Konstruktion mit dem geringsten Informationsgehalt als die beste Konstruktion. [Suh90]

Suh führt in [Suh90] weitere Theoreme an, die bei einer Konstruktion berücksichtigt werden sollten, im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter erläutert werden.

Bei der Entwicklung von Systemen erfolgt im ersten Schritt die Generierung von Systemkonzepten durch die Zuordnung von Design-Parametern und Prozessvariablen zu den funktionalen Anforderungen. Im Anschluss werden die Elemente weiter zerlegt und detailliert. Sobald eine weitere Zerlegung nicht mehr möglich ist, ist das System vollständig. [Suh98]

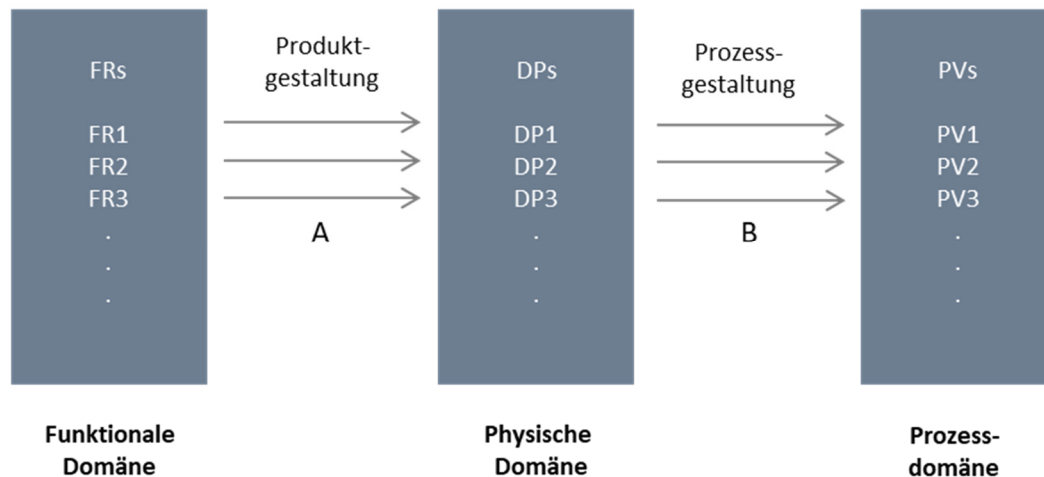


Abbildung 15: Axiomatic-Design-Ansatz in der Produktentwicklung (in Anlehnung an [Suh90])

CPM/PDD-Ansatz nach Weber

Der CPM/PDD-Ansatz (Characteristics-Properties Modelling/Property-Driven Development) von Weber [Webe05] verfolgt die Beschreibung von Entwicklungsprozessen und Produkten mithilfe von Eigenschaften und Merkmalen (siehe Abbildung 16).

Die Merkmale des Produktes C (wie z.B. Zahnbreite, Modul, Durchmesser, Anordnung) kann der Entwickler direkt beeinflussen, während sich die Eigenschaften P (z.B. Drehmoment wandeln) aus diesen Merkmalen zusammensetzen und dadurch nur indirekt beeinflussbar sind. Die Kombination zusammenhängender Merkmale und der draus resultierenden Eigenschaften stellt eine Lösung L dar. Die beiden zentralen Elemente stehen unter Einwirkung äußerer Randbedingungen über eine Matrix R in Relation zueinander. Diese externen Randbedingungen können auch relevante Eigenschaftssets eines X-Systems (z.B. Fertigungssystem) im Sinne von Design-for-X-Kriterien sein. [Webe05]

Der CPM/PDD-Ansatz erlaubt zwei verschiedene Betrachtungsrichtungen. Die Analyse-Richtung untersucht die Auswirkungen der Produktmerkmale auf die Produkteigenschaften, z.B. mithilfe von Simulationen und ermöglicht eine Bestimmung der Relationsmatrix. Die Syntheserichtung — die in der Produktentwicklung benötigte Richtung — verfolgt die Auswahl von Merk-

malen, welche die vorgegebenen Eigenschaften P_R erfüllen sollen, mithilfe der inversen Relati-
onsmatrix. Der Produktentwicklungsprozess nach Weber beginnt mit der Synthese von Merkma-
len zur Erfüllung der erforderlichen Eigenschaften P_R . Im nächsten Schritt wird eine Analyse
durchgeführt, in der die tatsächlichen Eigenschaften der gewählten Merkmale untersucht wer-
den. Daraufhin erfolgt eine Evaluierung der tatsächlichen und geforderten Eigenschaften um Ab-
weichungen zwischen beiden herauszuarbeiten. Auf Basis dieser Abweichungen werden Anpas-
sungen an den Merkmalen vorgenommen. [Webe05]

Durch diese theoretischen Betrachtungen bietet der CPM/PDD-Ansatz eine formalisierte Vorge-
hensweise bei der Entwicklung von Produkten.

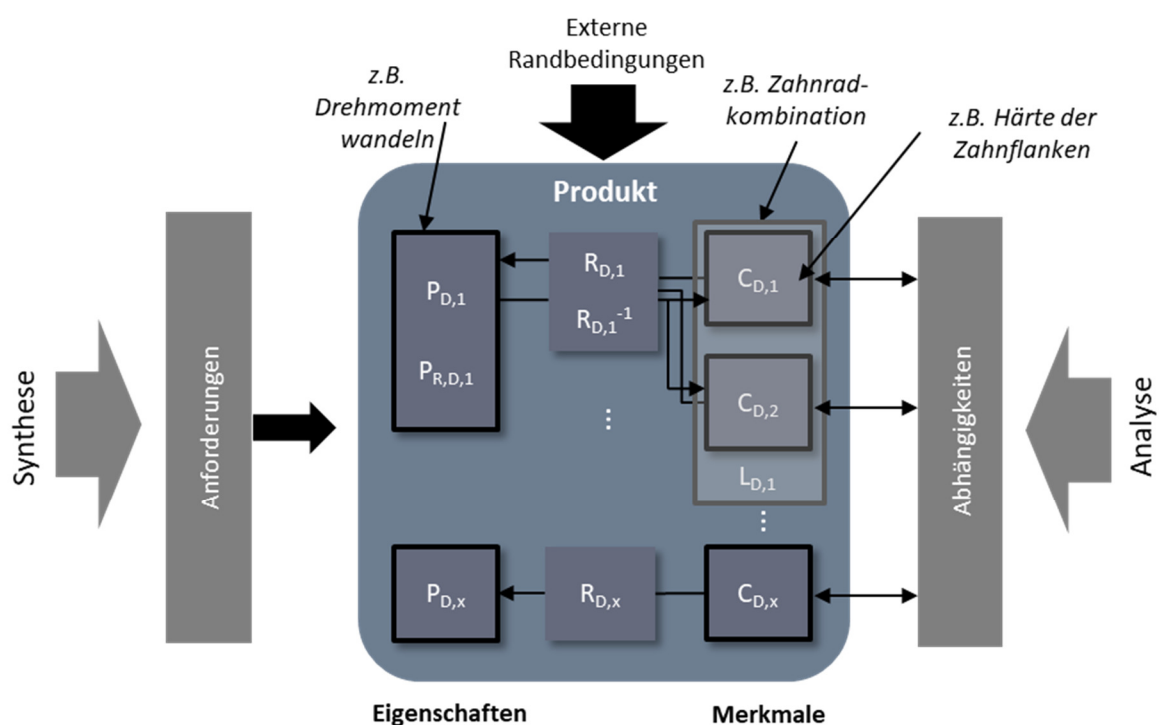


Abbildung 16: CPM/PDD-Ansatz (in Anlehnung an [Webe05])

In Kapitel 3.2.2 wenden Deubel et al. den CPM/PDD-Ansatz auch auf Produktionssysteme an.

Tabelle 3 stellt die einzelnen Vorgehensweisen zur Entwicklung von Produkten aus Kapitel 3.2.1
gegenüber. Die Phasen und Tätigkeiten innerhalb der Vorgehensweisen lassen sich in eine Spe-
zifikationsphase, eine Konzeptentwicklung, eine Komponentenentwicklung und Systemintegrati-
onsphase einordnen.

In der Spezifikationsphase werden die Anforderungen der verschiedenen Stakeholder an das Pro-
dukt ermittelt. In der Konzeptentwicklung lassen sich darauf aufbauend durch eine abstrakte For-
mulierung des Problems mit anschließender Lösungssuche verschiedene Konzepte entwickeln.

Für die ausgewählten Konzepte erfolgt während der Komponentenentwicklung im Anschluss die Ausgestaltung der einzelnen Baugruppen und Bauteile. Abschließend werden die ausgestalteten Komponenten zum Gesamtsystem zusammengesetzt.

	VDI2221 [VDI2221]	Ulrich & Eppinger [UIEp08]	Akao [Akao90]/Hauser & Clausing [HaCl88]	Suh [Suh90]	Weber [Webe05]
Spezifikation	Definition	Konzeptentwicklung	Anforderungsdefinition	Auswahl der funktionalen Anforderungen	Anforderungsanalyse
	Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung	Analyse des Bedarfs	Bestimmung der Kundenanforderungen	Festlegung der funktionalen Anforderungen FRs und Randbedingungen	Bestimmung der Anforderungen/ Eigenschaften
Konzeptentwicklung	Entwurf	Konzeptentwicklung/ Systementwicklung	Konzepterstellung	Konzepterstellung	Konzeptentwicklung
	Ermittlung von Funktionen und deren Strukturen Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	Entwicklung alternativer Konzepte Entwicklung der Produktarchitektur	Ermittlung der relevanten Funktionen	Zuweisung der Design Parameter DPs und Prozessvariablen PVs	Festlegung der Hauptmerkmale (Synthese) Analyse der resultierenden Eigenschaften Ableitung von Optimierungspotenzialen
Komponentenentwicklung	Entwurf/ Realisierung	Detailentwicklung	Bauteilentwicklung	Zerlegung des Konzepts	Detailentwicklung
	Gliederung in realisierbare Module Gestaltung der maßgebenden Module	Ausgestaltung der Bauteile	Ermittlung der kritischen Produktmerkmale	Zerlegung der funktionalen Anforderungen, Design Parameter und Prozessvariablen	Verfeinerung der Merkmale mit Analyse- und Syntheseschritten
Systemintegration	Realisierung				
	Gestaltung des gesamten Produkts				

Tabelle 3: Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Produkten

Bei den vorgestellten Ansätzen zur Entwicklung von Produkten wird eine Integration der beiden klassischen Fachbereiche nicht ausreichend berücksichtigt. Einige Ansätze, wie die von Ulrich & Eppinger [UIEp08] sowie Akao [Akao90] und sowohl Hauser & Clausing [HaCl88] als auch Suh [Suh90] adressieren bereits während der Produktentwicklung Produktionsaspekte. Eine integrierte Betrachtung von Produkt und Prozess — allerdings ohne Bewertung — findet jedoch nur beim Axiomatic Design nach Suh [Suh90] statt. Materialaspekte werden von keinem der Ansätze ausreichend berücksichtigt.

3.2.2 Produktionssystementwicklung

Wie bereits in Kapitel 3.1 festgestellt wurde, gibt es im Bereich der Entwicklung von Produktionssystemen unterschiedliche Begrifflichkeiten, die teilweise die gleichen Tätigkeiten beschreiben. Des Weiteren gibt es je nach Quelle Unterschiede in der hierarchischen Strukturierung der verschiedenen Prozesse und Objekte.

Die Produktion ist der Prozess, in dem Produkte aus ihren Materialbestandteilen hergestellt werden [CIRP90]. Dieser Prozess findet in einer Fabrik statt, in der verschiedene technologische Verfahren unter Einsatz von Menschen, Betriebsmitteln, Material, Energie und Informationen angewendet werden [Helb10]. Je nach Untersuchungsrahmen werden die gesamte Fabrik oder einzelne Bereiche als Produktionssystem verstanden [Webe96].

Bellgran und Säfsen sehen das Produktionssystem als ein Transformationssystem, dessen Aufgabe es ist, ein Objekt im initialen Zustand in ein Objekt mit einem veränderten Zustand zu transformieren [BeSä10]. Der Mensch und die technischen Systeme wirken direkt auf den Transformationsprozess ein und werden durch das Management und Informationssystem geleitet (siehe Abbildung 17). Das gesamte System steht schließlich im Austausch mit der Umwelt. [HuEd88, BeSä10]

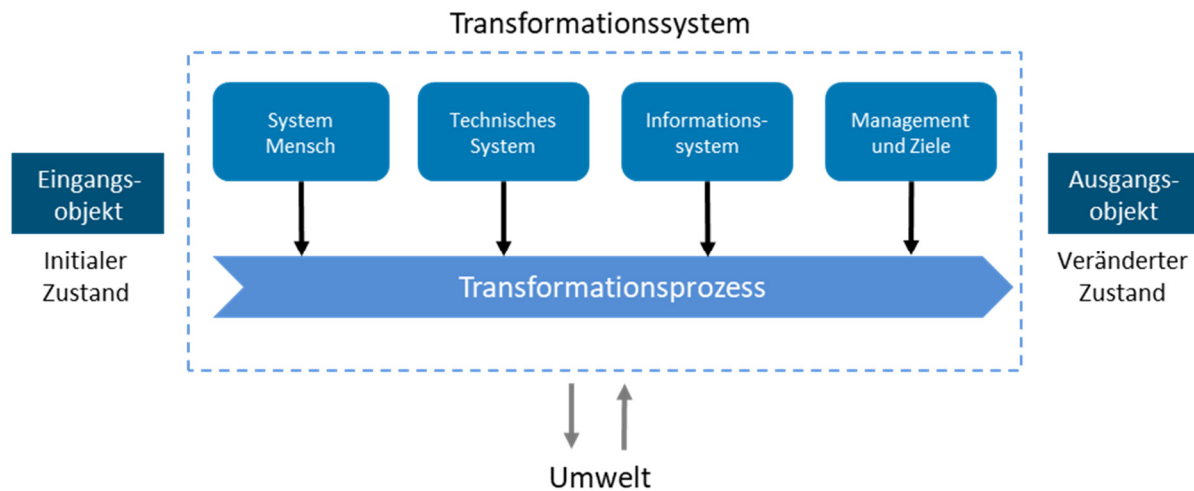


Abbildung 17: Produktionssystem als Transformationssystem (in Anlehnung an [HuEd88])

Für die Vorgänge, die erforderlich sind um ein Produktionssystem ausgehend von bestimmten Randbedingungen zu realisieren, existieren verschiedene Begrifflichkeiten. Die Begriffe (*Technische*) *Produktionsplanung*, *Arbeitsplanung*, *Fertigungsplanung*, *Prozessentwicklung* und *Produktionssystementwicklung* beschreiben je nach Untersuchungsrahmen diesen Vorgang. Nach Aggteleky und Meirlohr ist die Gestaltung des Produktionssystems neben der Gebäudeplanung ein Teil der Fabrikplanung [Aggt87, Meie03].

Im weiteren Verlauf werden folgende Ansätze vorgestellt:

- Arbeitsplanung nach Minolla
- Arbeitsplanung nach Eversheim
- Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme nach REFA
- Entwicklung von Produktionssystemen nach Bellgran und Säfsten
- Axiomatic Design für Produktionssysteme nach Suh
- Axiomatic Design für Produktionssysteme nach Gu et al.
- CPM/PDD für Produktionssysteme nach Deubel et al.
- Entwicklung von Produktionssystemen nach VDI-Richtlinie 4499
- Entwicklung von Produktionssystemen nach Wu
- Produktionsplanung nach Spur

Im Anschluss daran erfolgt eine Zusammenfassung und Ordnung der wesentlichen Ansätze.

Arbeitsplanung nach Minolla

Minolla bezeichnet die Abläufe zwischen der Konstruktion des Produktes und der Fertigung als Arbeitsvorbereitung. Dabei unterscheidet er zwischen der Arbeitsplanung und der Arbeitssteuerung. Die Arbeitsplanung beschreibt die Planungstätigkeiten, die erforderlich sind, um die wirtschaftlich und technisch einwandfreie Herstellung der Produkte zu gewährleisten. Dazu zählen beispielsweise das Ableiten der Fertigungsunterlagen aus der Produktdokumentation, Material- und Layoutplanung sowie die Planung der Arbeitsvorgänge und Betriebsmittel. Die Arbeitssteuerung beschreibt hingegen alle Maßnahmen zur Auftragsabwicklung. [Mino75]

Arbeitsplanung nach Eversheim

Eversheim unterteilt die Arbeitsplanung wiederum in eine Arbeitsablaufplanung (Prozessgestaltung) und eine Arbeitssystemplanung (Produktionsmittelgestaltung) [Ever02].

In der Arbeitsablaufplanung (kurz- bis mittelfristig) werden unter anderem die Prozesse geplant und detailliert, die Fertigungs- und Prüfmittelplanung durchgeführt und das Steuerungsprogramm geschrieben. Die Kostenplanung berücksichtigt hierbei die wirtschaftlichen Aspekte. In der Arbeitssystemplanung (mittel- bis langfristig) finden z.B. die Fertigungsmittel-, die Lager- und Transport-, die Personal-, Flächen- und Gebäudeplanung statt. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird der Prozess durch die Investitionsrechnung unterstützt. [Ever02]

Abbildung 18 zeigt die Gesamtanordnung der verwendeten Prozesse und Tätigkeiten. Der Umfang der Arbeitssystemplanung hängt schließlich davon ab, inwiefern bestehende Produktionssysteme mit oder ohne Anpassung genutzt werden können. Das ist wiederum stark vom Produkt und der Flexibilität des Produktionssystems abhängig. In der Fertigungsmittelplanung werden die für den Herstellprozess benötigten Fertigungs- und Montagesysteme (Produktionssysteme) ausgelegt. [Ever02]

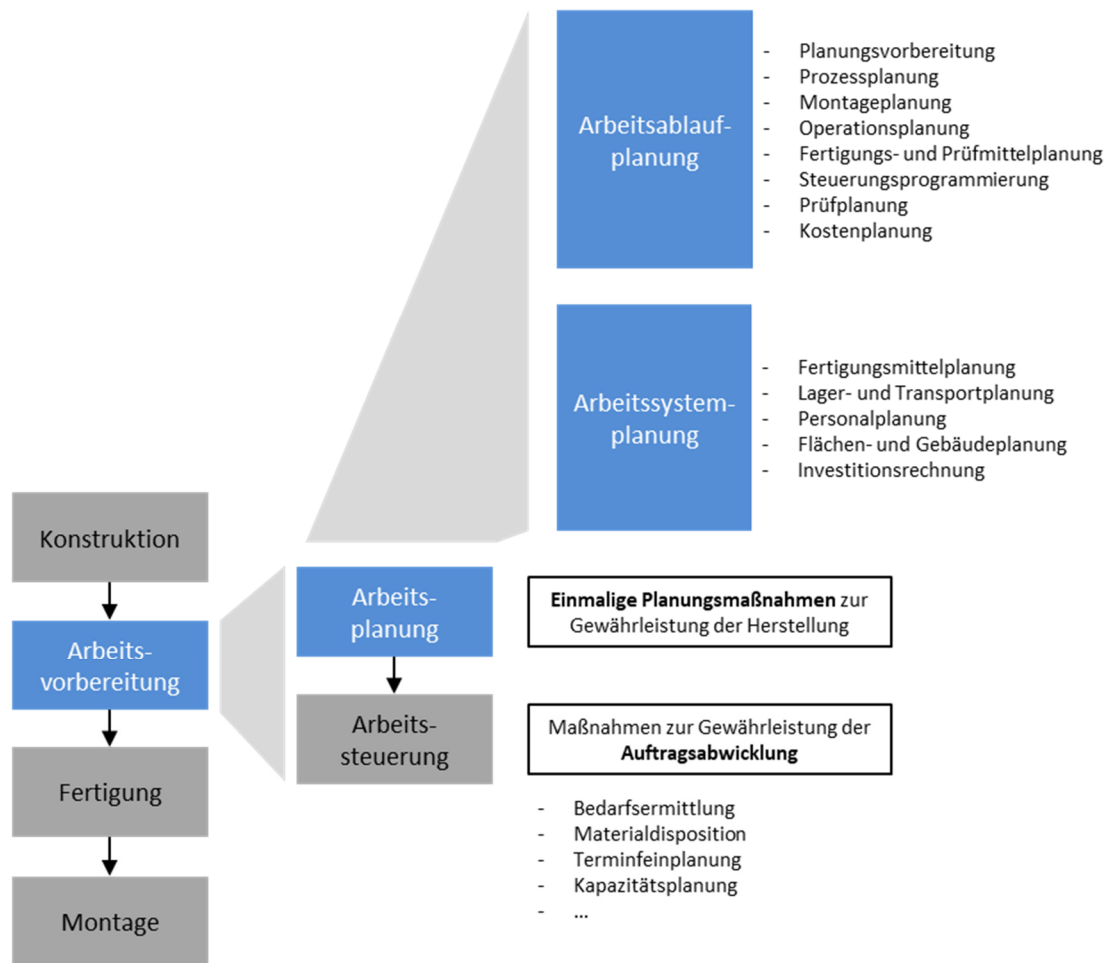


Abbildung 18: Arbeitsplanung im Rahmen der Produktentstehung (in Anlehnung an [Mino75, Ever02])

Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme nach REFA

Der REFA-Verband für Arbeitsstudien beschreibt in [REFA90] einen weiteren Ansatz zur Planung von Produktionssystemen. Abbildung 19 zeigt eine Übersicht aller Prozesse und der für die Planung relevanten Methoden.

Die Systematik ist in sechs Planungsstufen unterteilt, wovon die ersten beiden hier als vorbereitende Planungstätigkeiten zusammengefasst sind. Darauf aufbauend, wird eine Grobplanung des Produktionssystems durchgeführt. In dieser Phase werden verschiedene Möglichkeiten für die Produktionsabläufe und das Produktionssystem entwickelt, bewertet und schließlich die beste Lösung ausgewählt. [REFA90]

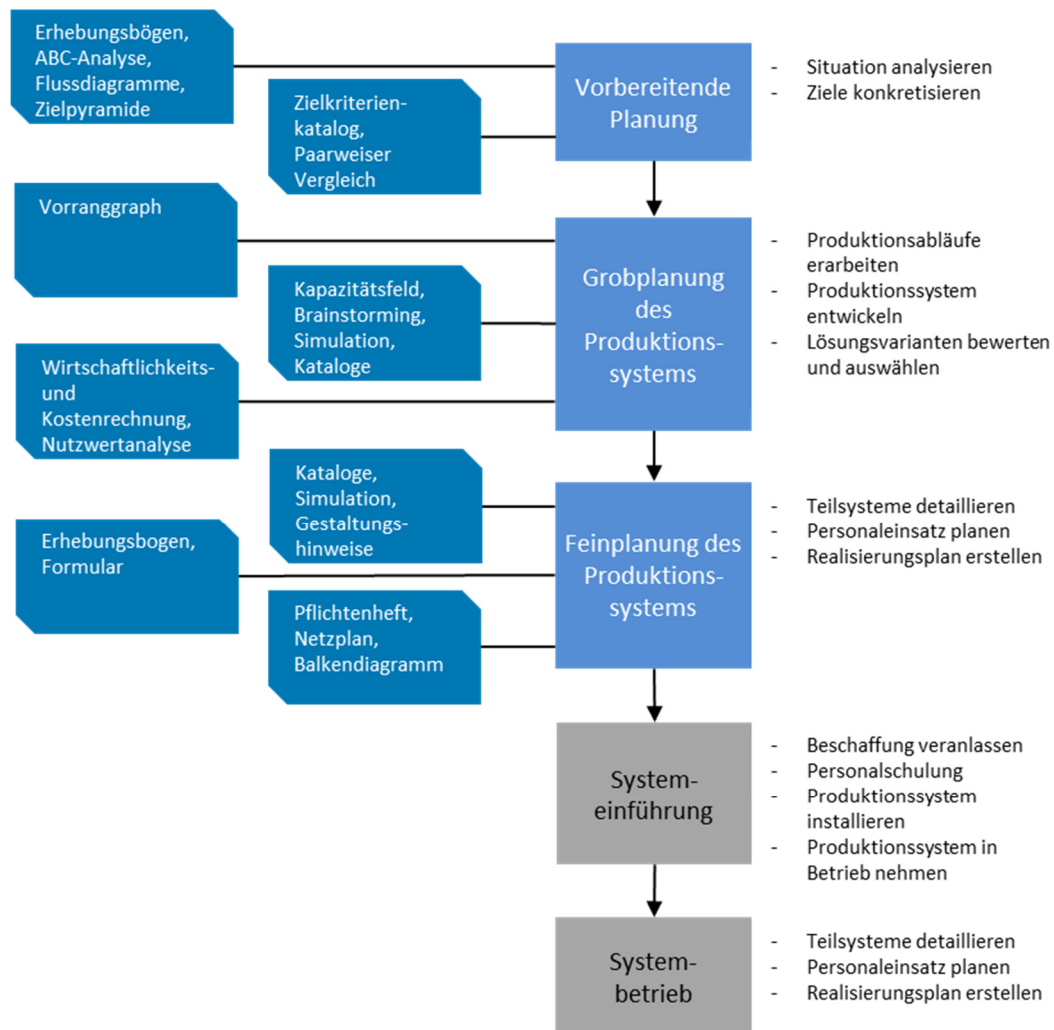


Abbildung 19: REFA Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme (in Anlehnung an [REFA90])

Diese wird in der anschließenden Feinplanung in ihren Teilsystemen detailliert. Zu den weiteren Tätigkeiten gehören die Personalplanung und der Realisierungsplan. Abschließend wird das System eingeführt, realisiert und in Betrieb genommen und kann schließlich die Produktion aufnehmen. [REFA90]

Entwicklung von Produktionssystemen nach Bellgran und Säfsten

Bellgran und Säfsten [BeSä10] stellen einen Ansatz zur Entwicklung von Produktionssystemen vor, der auf [Bell98] basiert und in Abbildung 20 dargestellt ist.

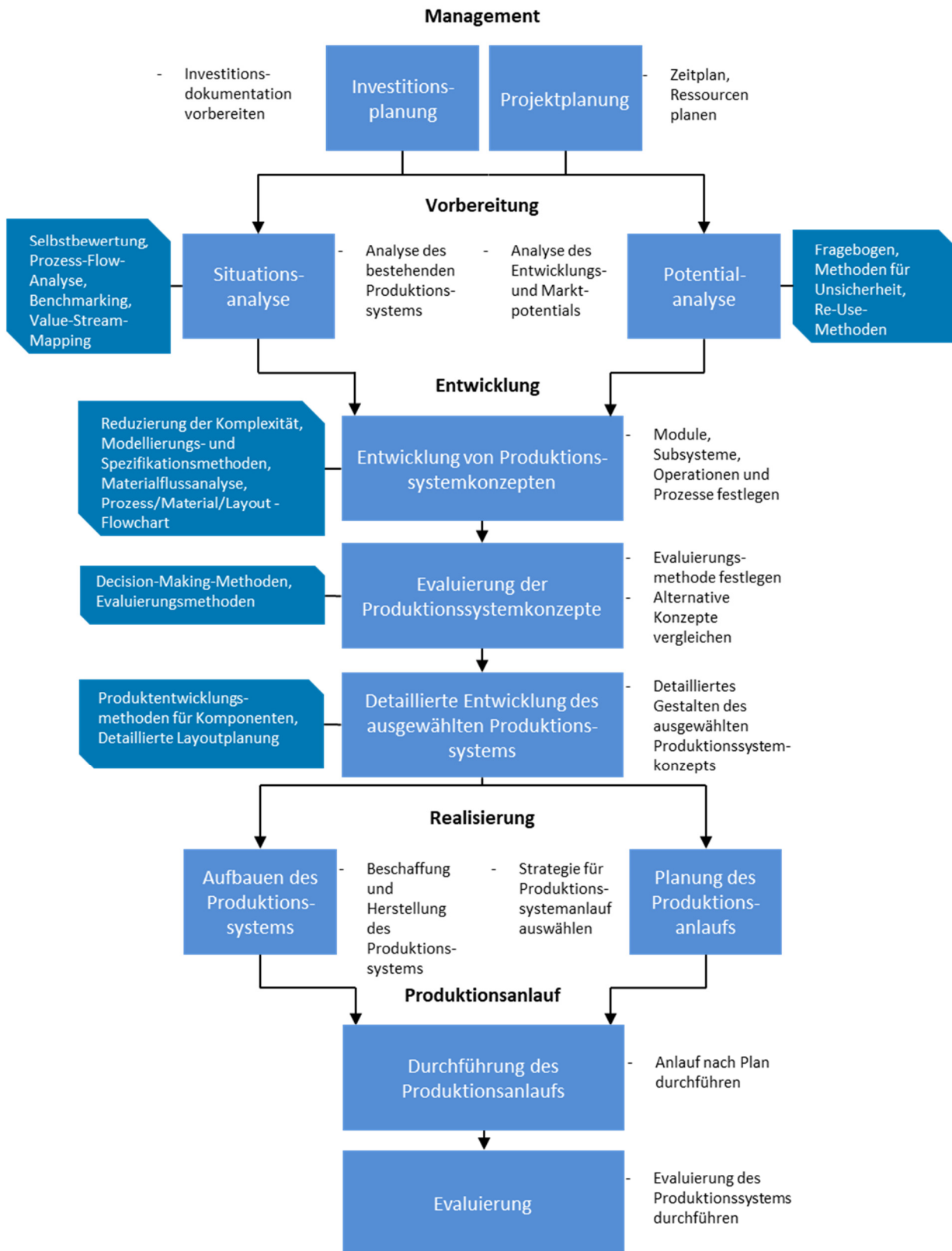


Abbildung 20: Produktionssystementwicklungsprozess nach Bellgran und Säfsen (in Anlehnung an [BeSä10, Bell98])

Ausgehend von Managementtätigkeiten wie der Projekt- und Investitionsplanung werden vorbereitende Maßnahmen durchgeführt. Das bestehende Produktionssystem und die entsprechenden Markt- sowie Entwicklungspotenziale werden analysiert. Nach der Management- und Vorbereitungsphase startet die eigentliche Entwicklung des Systems. [BeSä10]

Zuerst werden Produktionssystemkonzepte erarbeitet, die verschiedene Module, Subsysteme, Operationen, Prozesse usw. beinhalten. Anschließend wird eine Evaluierung der verschiedenen Konzepte durchgeführt. Das ausgewählte Konzept wird schließlich im letzten Entwicklungsschritt detailliert. [BeSä10]

Sobald das Produktionssystem fertig entwickelt ist, kann die Realisierungsphase beginnen. Die verschiedenen Komponenten werden entweder beschafft oder hergestellt und danach aufgebaut. Parallel dazu wird eine geeignete Anlaufstrategie entwickelt. Im Anschluss kann das System in Betrieb genommen und der Produktionsanlauf durchgeführt werden. Abschließend findet eine Evaluierung des entwickelten Produktionssystems statt. [BeSä10]

Axiomatic Design für Produktionssysteme nach Suh

Suh wendet in [Suh95] den Axiomatic-Design-Ansatz aus dem Bereich der Produktentwicklung auf umfangreiche Systeme wie beispielsweise Produktionssysteme an. Dieser Ansatz wird in [SuCL98] und [Suh98] aufgegriffen und weiter ausgearbeitet.

Wie in Abbildung 21 dargestellt, arbeitet das Axiomatic Design für Produktionssysteme mit vier zentralen Ebenen (Kunde, Funktionen, physische Umsetzung und Prozesse) [Suh95]. Der Ansatz beginnt mit den Kundenmerkmalen {CAs}, die aus dem sozialen Bedarf abgeleitet werden [Suh90]. Zur Erfüllung dieser Kundenmerkmale werden entsprechende Funktionen {FRs} (z.B. Flexibilität) aufgestellt. Entsprechende Design-Parameter {DPs} (z.B. Layout), die die Funktionen erfüllen, sind im Anschluss auszuwählen. Abschließend werden spezielle Prozessvariablen {PVs} (z.B. Werkzeugmaschinen) festgelegt, die die vorher festgelegten Design-Parameter realisieren können. Diese vier zentralen Objekte werden durch Vektoren {} repräsentiert. Benachbarte Vektoren stehen über spezielle Matrizen (Design-Matrizen A, B) zueinander in Relation. [Suh95, SuCL98]

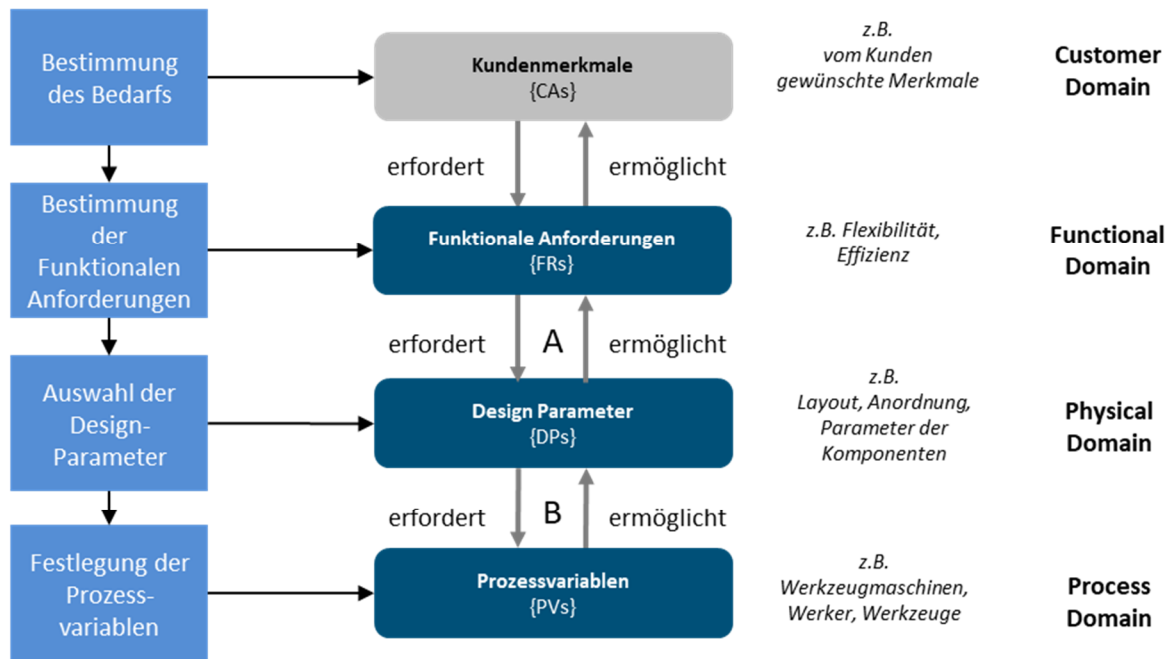


Abbildung 21: Axiomatic Design für Produktionssysteme (basierend auf [Suh90, Suh95])

Die Vorgehensweise setzt die Einhaltung verschiedene Axiome voraus. Das Unabhängigkeits-Axiom schreibt vor, dass die funktionalen Anforderungen/Funktionen unabhängig voneinander sein sollen. Das Informations-Axiom verfolgt die Minimierung des Informationsgehalts der Konstruktion. Unter den Konzepten, die das Unabhängigkeitsaxiom erfüllen, ist das Konzept mit dem niedrigsten Informationsgehalt das Beste. [Suh90, Suh95]

Cochran stellt in [Coch99] eine weitere Vorgehensweise zur Entwicklung von Produktionssystemen auf Basis des Axiomatic-Design-Ansatzes vor.

Axiomatic Design für Produktionssysteme nach Gu et al.

Gu et al. erweitern in [GuRT01] den Axiomatic-Design-Ansatz für Produktionssysteme von Suh nach [Suh95]. Der Entwicklungsprozess wird in mehrere Phasen eingeteilt (siehe Abbildung 22). Innerhalb der Anforderungsdefinition werden hierarchisch gegliederte funktionale Anforderungen {FRs} an das System gestellt und Randbedingungen festgelegt. In der anschließenden Konzeptentwicklung, werden Operationen festgelegt, existierende Maschinen ausgewählt oder die Entwicklung neuer Maschinen eingeleitet und die Art des Produktionssystems bestimmt. Außerdem sind die Identifikation des späteren Materialflusses und die grobe Festlegung der Fertigungs-

prozesse eine zentrale Aufgabe. Dazu werden den funktionalen Anforderungen Design-Parameter {DPs} und Prozessvariablen {PVs} zugeordnet. Die funktionale Anforderung, 20 Teile A am Tag zu produzieren, kann beispielsweise durch den Durchsatz (DP) beeinflusst werden, welcher wiederum von der Kapazität der Maschine (PV) abhängig ist. Die gewählten Design-Parameter und Prozessvariablen beeinflussen schließlich die nachfolgende Phase. [GuRT01]

Im nächsten Schritt, der Konfigurationsentwicklung, wird das erarbeitete Konzept weiter detailliert und das Layout sowie der Materialfluss festgelegt. Für das Konzept inklusive Layout und das Materialflusssystem werden wieder Design-Parameter (z.B. $DP_{c,1}$: Kapazität des Materialpuffers) aufgestellt, die von Prozessvariablen (z.B. $PV_{c,1,1}$: Umfang des Puffers) erfüllt werden. Abschließend werden alle Design-Parameter des Systems in der Detailentwicklung vollständig ausgestaltet. [GuRT01]

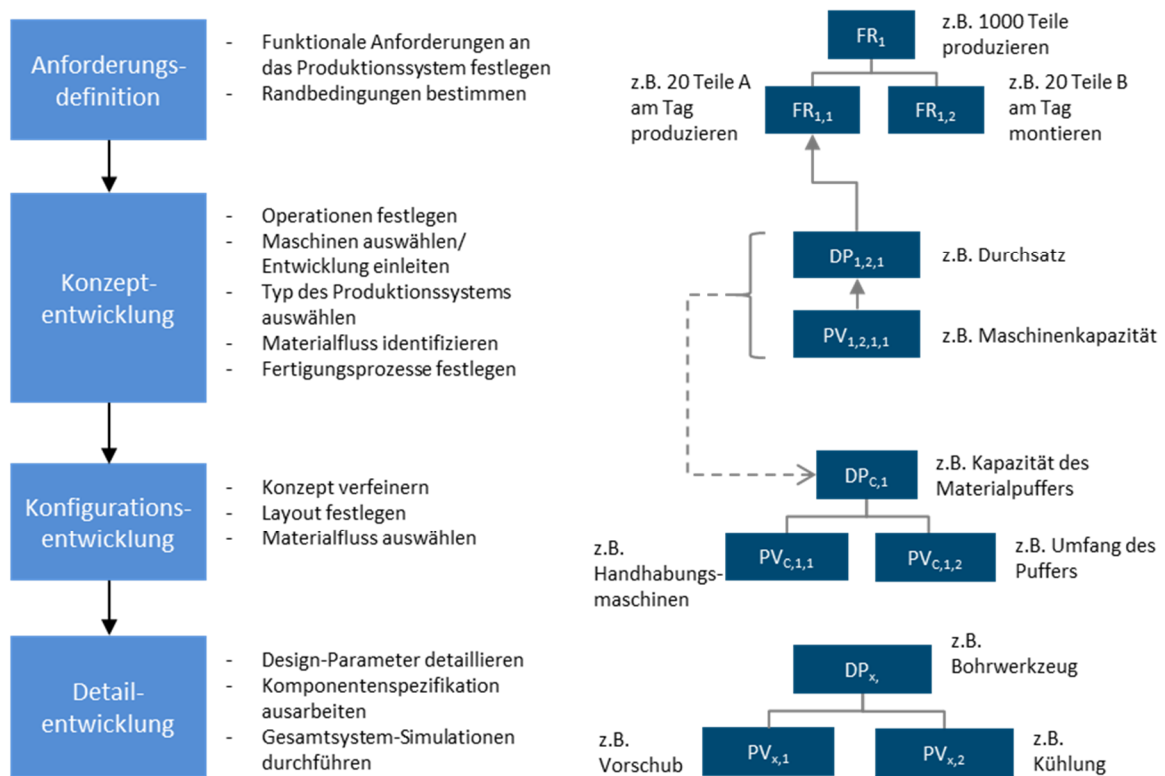


Abbildung 22: Entwicklung von Produktionssystemen nach Gu et al. (basierend auf [GuRT01])

CPM/PDD für Produktionssysteme nach Deubel et al.

Deubel et al. wenden in [DZBW06] den CPM/PDD-Ansatz von Weber [Webe05] auf Produktionssysteme an. Basierend auf den Arbeiten von Eversheim [Ever02] und Bullinger [Bull86] werden, ausgehend vom Produktmodell, die erforderlichen Fertigungsprozesse und deren Reihenfolge festgelegt. Im nächsten Schritt erfolgen die Auswahl der für die Prozesse benötigten Maschinen

und der zugehörigen Ausrüstung, welche daraufhin detailliert werden. Im Anschluss an die Entwicklung des Produktionssystems erfolgen die Realisierung und der anschließende Anlauf der Produktion. [DZBW06]

Die CPM/PDD-Methode von Weber [Webe05] soll diese Vorgehensweise unterstützen, indem sie dem Entwickler hilft die komplexen Zusammenhänge besser zu verstehen. Die gewünschten Eigenschaften des Produktionssystems (z.B. Flexibilität, Taktzeit, Ressourcenverbrauch usw.) synthetisieren sich aus den vom Entwickler festgelegten Merkmalen (z.B. Anzahl der Puffer, Beschleunigung usw.). Verschiedene Ebenen (System, Maschine, Komponente) ermöglichen eine bessere Strukturierung bei der Zusammenarbeit zwischen OEMs und Zulieferern. Dabei ergeben sich einige Merkmale jeweils aus den Eigenschaften der darunterliegenden Ebene. [DZBW06]

Deubel et al. schlagen eine Integration von Schlüsseleigenschaften und den damit korrelierenden Merkmalen in die Ressourcen-Bibliotheken von Planungssoftware vor, um die Effizienz beim Einsatz dieser Methode zu verbessern [DZBW06].

Entwicklung von Produktionssystemen nach VDI-Richtlinie 4499

Die VDI-Richtlinie 4499 [VDI4499] stellt im Rahmen der Digitalen Fabrik eine weitere Vorgehensweise für die Entwicklung von Produktionssystemen vor (siehe Abbildung 23). Der Fokus liegt hier jedoch im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Ansätzen stärker auf der Entwicklung der technischen Maschinen, die das System zusammensetzen.

Die Entwicklung startet mit der Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren (Technologien), und der Festlegung der Reihenfolge zur Gewährleistung der Herstellung der Produkte. Des Weiteren wird ein grobes Layout des Produktionssystems bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Entwicklung der Betriebsmittel, in der alle Bearbeitungsstationen ausgestaltet werden. Dabei werden die verschiedenen Tätigkeiten parallel, aber mit einem zeitlichen Versatz abgearbeitet. [VDI4499]

Die Entwicklung der einzelnen Stationen startet mit der mechanischen Konstruktion, die auf geometrischen Randbedingungen durch das Layout und dem Fertigungsverfahren aufbaut [VDI4499]. Simulationen wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) unterstützen dabei Dimensionierung und Gestaltung.

Die Elektro- und Fluidkonstruktion startet etwas zeitversetzt und verfolgt die Ausarbeitung der Elektrik, Pneumatik und Hydraulik (je nach Maschine) [VDI4499]. Domänenspezifische Simulationsmethoden verbessern die Qualität der Ergebnisse.

In der Entwicklung der Steuerungssoftware, die mit einem größeren zeitlichen Versatz startet, wird die Steuerungssoftware für die Anlage entworfen [VDI4499]. Spezifische Simulationsmethoden aus der Softwareentwicklung unterstützen dabei den Entwickler.

Mit der Elektro- und Fluidkonstruktion beginnt auch die virtuelle Inbetriebnahme, in der das Zusammenspiel aus Mechanik, Elektrik und der Steuerungssoftware abgesichert wird. Abschließend erfolgen die Realisierung und Inbetriebnahme des Produktionssystems, bevor die Produktion anlaufen kann. [VDI4499]

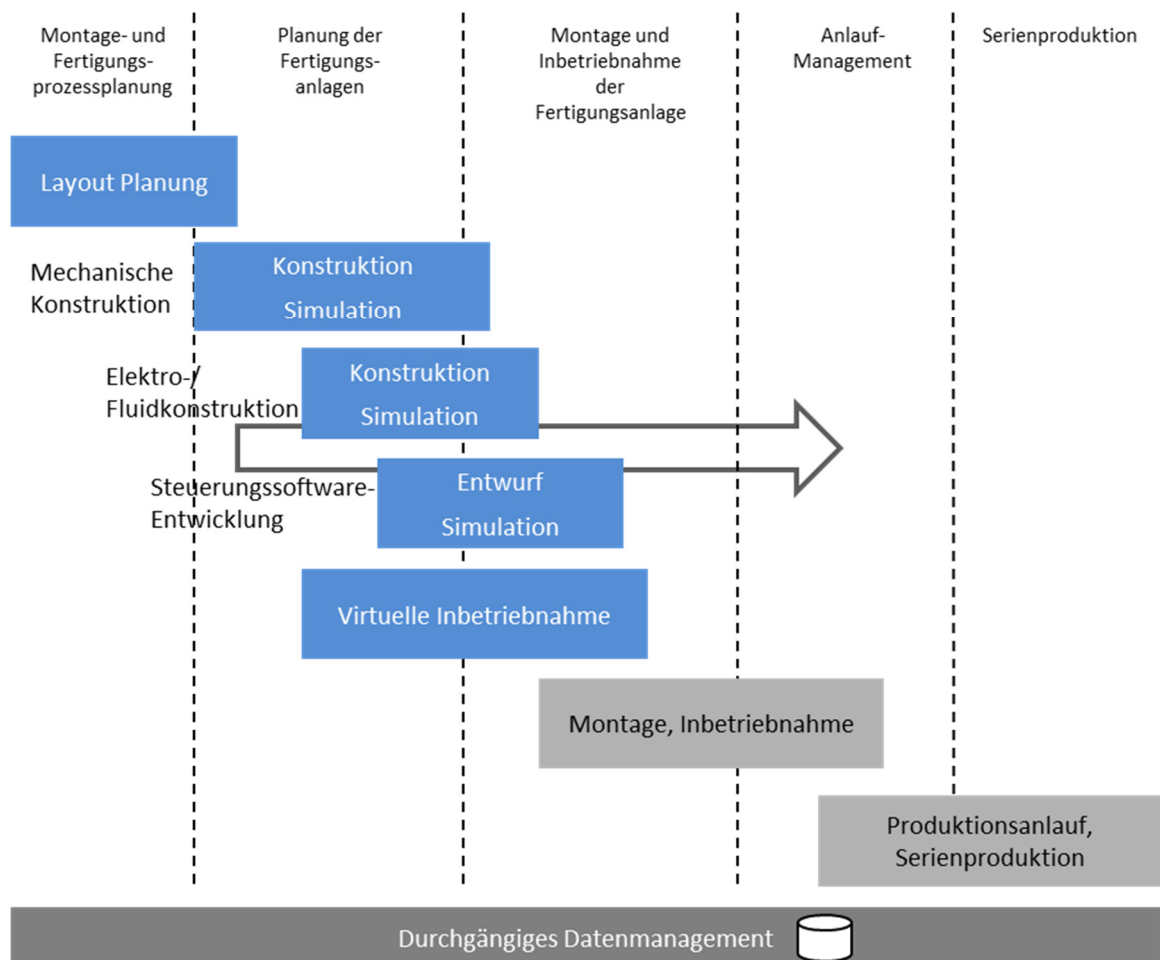


Abbildung 23: Entwicklung von Produktionssystemen nach der VDI-Richtlinie 4499 (in Anlehnung an [VDI4499])

Entwicklung von Produktionssystemen nach Wu

Abbildung 24 zeigt das allgemeine Vorgehen zur Entwicklung von Produktionssystemen nach Wu [Wu94]. Ausgehend von der Problemstellung wird eine Situationsanalyse durchgeführt, die das aktuelle und zukünftige Marktpotenzial untersucht. Die Ziele für das Produktionssystem lassen sich aus den gewonnenen Resultaten ableiten. [Wu94]

Anschließend startet die eigentliche Entwicklung mit der Generierung alternativer Konzepte. Diese Konzepte beinhalten die Anordnung potenzieller Kombinationen aus verschiedenen Herstellungs- und Logistikfunktionen sowie mögliche Steuerungsfunktionen. [Wu94]

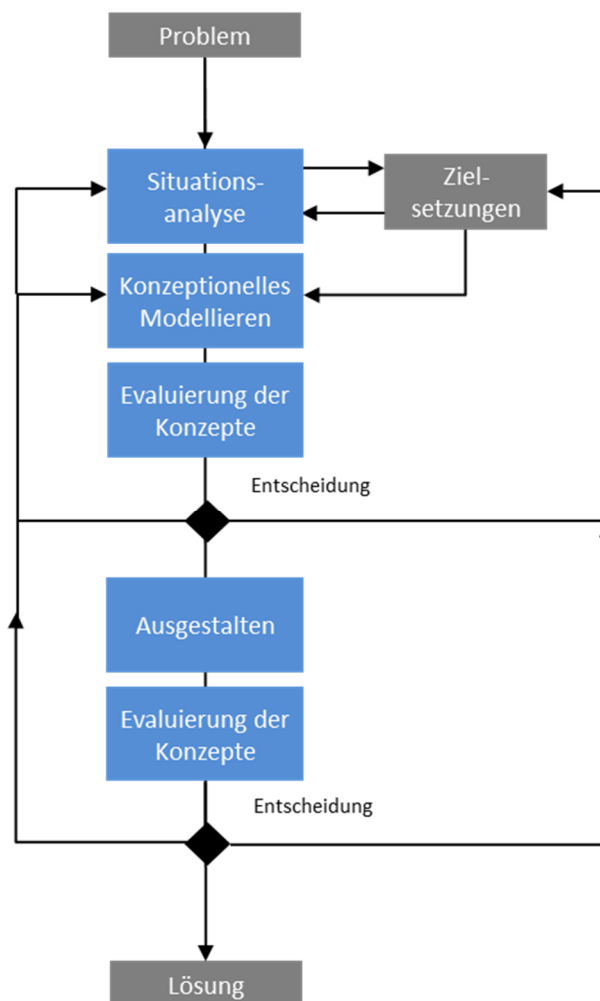


Abbildung 24: Allgemeine Vorgehensweise bei der Entwicklung von Produktionssystemen nach Wu (in Anlehnung an [Wu94])

Eine entsprechende Bibliothek kann im Unternehmen bereits existierende Herstellungsfunktionen und die dafür notwendigen Operationen verwalten und den Produktentwicklern den Zugriff darauf ermöglichen. Noch nicht vorhandene Funktionen müssen zuerst in das Produktionssystem integriert werden. [Wu94]

Diese Konzepte werden daraufhin nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien evaluiert. Die Ausgestaltung des gewählten Konzepts erfolgt im Anschluss. Die Tätigkeiten dieses Prozessschritts beinhalten die Auswahl und Zuordnung der benötigten Komponenten und Infrastruktur des Produktionssystems. Gleichzeitig werden die Steuerungsfunktionen durch die Verknüpfung entsprechender Hardware, Algorithmen und Steuerungssoftware umgesetzt. Abschließend wird das ausgestaltete Konzept wieder evaluiert. Werden alle Anforderungen und Ziele unter den gegebenen Randbedingungen erreicht, wird eine Freigabe erteilt. [Wu94]

Produktionsplanung nach Spur

Spur beschreibt in [Spur94] ein Vorgehen zur Fabrikplanung, in der die Produktionsplanung als die Planung von Produktionsstätten verstanden wird. Dabei werden Aspekte der Fabrikplanung von Kettner et al. [KeSG84] mitberücksichtigt.

Die Planung von Produktionssystemen ist neben der Planung von Fabrikbauten zentraler Bestandteil der Planung von Produktionsstätten. Sie gliedert sich in die Phasen Produktionssystemplanung, -auslegung und -erprobung (siehe Abbildung 25). [Spur94]

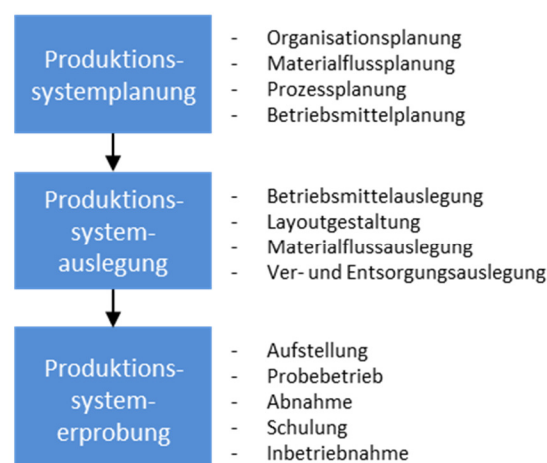


Abbildung 25: Produktionsplanung nach Spur (in Anlehnung an [Spur94])

In der Produktionssystemplanung werden organisatorische Aspekte, der Materialfluss, die Prozesse und die Betriebsmittel geplant. Im Anschluss erfolgt die Auslegung der dafür notwendigen Komponenten sowie die Gestaltung der Anordnung zueinander. Zusätzlich ist eine Auslegung der

Ver- und Entsorgung erforderlich. Abschließend werden die Komponenten aufgebaut und abgenommen, woraufhin die Inbetriebnahme durchgeführt werden kann. [Spur94]

Neben den hier vorgestellten Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Produktionssystemen existiert noch eine Vielzahl weiterer Ansätze. Die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] wendet beispielsweise das V-Modell auf Produktionssysteme an.

In diesem Kapitel wurden verschiedene etablierte Vorgehensweisen für die Entwicklung von Produktionssystemen vorgestellt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Begrifflichkeiten und Inhalte zwischen den verschiedenen Ansätzen teilweise voneinander abweichen. Dennoch lassen sich Gemeinsamkeiten zwischen den einzelnen Phasen erkennen, so dass eine Eingliederung in ein gemeinsames Modell möglich ist. Tabelle 4 stellt noch einmal die wichtigsten Phasen mit den jeweiligen Planungstätigkeiten der wesentlichen Ansätze aus Kapitel 3.2.2 gegenüber und fasst diese zu vier Hauptphasen zusammen (Realisierung nicht weiter betrachtet). Der CPM/PDD-Ansatz für Produktionssysteme nach Deubel et al. [DZBW06] gestaltet sich analog zum Produkt und wurde daher in dieser Zusammenfassung nicht nochmal extra aufgeführt.

Die Spezifikationsphase leitet aus der aktuellen und zukünftigen Marktsituation, den verschiedenen Stakeholdern und dem herzustellenden Produkt die Anforderungen an das Produktionssystem ab. Des Weiteren werden die Ziele definiert und Randbedingungen festgelegt.

Die Konzeptentwicklungsphase legt im Anschluss die Fertigungsverfahren, die Operationen und deren Reihenfolge fest. Es entsteht ein grobes Layout mit den an der Herstellung beteiligten Komponenten. Die Auswahl an Maschinen findet bei manchen Ansätzen schon an dieser Stelle statt. Im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch die Zuordnung wie bei [Ever02], [VDI4499], [BeSä10] und [REFA90] gewählt.

Die Komponenten, welche die Bearbeitungs-, Handhabungs- und Montageoperationen durchführen, werden daraufhin in der Komponentenentwicklung ausgewählt, entwickelt und entsprechend zugeordnet. Ansätze aus der Produktentwicklung können wiederum die Entwicklung solcher Maschinen/Komponenten unterstützen. Die Entwicklung findet jedoch oftmals nicht beim Hersteller, sondern bei einem externen Zulieferer statt.

	Eversheim, Minolla [Ever02]/ [Mino75]	REFA [REFA90]	Bellgran & Säfsten [BeSä10]	Suh [Suh95]	Gu et al. [GURT01]	VDI4499 [VDI4499]	Wu [Wu94]	Spur [Spur94]
Spezifikation		Vorbereitende Planung	Vorbereitung/ Analyse	Auswahl der funktionalen Anforderungen	Anforderungsdefinition		Situationsanalyse	
		Analyse der Situation, Festlegen der Ziele	Analyse des Entwicklungs- und Marktpotenzials und des bestehenden Produktionssystems	Bestimmung der funktionalen Anforderungen FRs & Randbedingungen	Bestimmung der funktionalen Anforderungen FRs & Randbedingungen		Analyse des Marktpotenzials	
Konzeptentwicklung	Arbeitsablaufplanung	Grobplanung	Konzeptentwicklung	Konzepterstellung	Konzept- & Konfigurationsentwicklung	Konzeptentwicklung	Konzeptionelles Modellieren	Produktionssystemplanung
	Festlegung der Bearbeitungsprozesse & -abfolge	Bestimmung der Abläufe, Bewertung und Auswahl von Lösungsvarianten	Festlegung der Module, Operationen und Prozesse	Zuweisung der Design-Parameter DP's und Prozessvariablen PV's	Auswahl der Operationen, Maschinen und Komponenten Anordnung der Komponenten Zuordnung von DP's und PV's zu FRs	Auswahl des Layouts & der Technologien	Anordnung der Herstellungs-, Logistik- und Steuerungsfunktionen	Planung von Organisation, Materialfluss, Prozess und Betriebsmittel
Komponentenentwicklung	Arbeitssystemplanung /Produktionsmittelgestaltung	Feinplanung	Detaillierung	Zerlegung des Konzeptes	Detaillentwicklung	Komponentenentwicklung	Ausgestalten	Produktionssystemauslegung
	Bestimmung der Fertigungsmittel, des Layouts und der Logistik	Detaillierung der Teilsysteme	Ausgestaltung des Konzeptes	Zerlegung der funktionalen Anforderungen, Design-Parameter und Prozessvariablen	Spezifizierung der Komponenten	Ausgestaltung der Stationen	Auswahl und Zuordnung der Komponenten	Auslegung der benötigten Komponenten
Systemintegration					Gesamtsystem-Simulation	Virtuelle Inbetriebnahme		
					Umfassende Evaluierung	Überprüfung des Zusammenspiels von Hardware und Software		

Tabelle 4: Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Produktionssystemen

Eine abschließende Evaluierung des Produktionssystems analysiert das Zusammenspiel aller Komponenten und ermöglicht damit eine Überprüfung der Spezifikationen und Anforderungen noch bevor das System physisch realisiert werden kann. Nach positivem Ergebnis kann das Produktionssystem hergestellt und aufgebaut werden.

Eine Integration der Produktentwicklung wird in den vorgestellten Ansätzen nicht ausreichend berücksichtigt.

4 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden für diese Arbeit relevante Beiträge aus Forschung und Wissenschaft analysiert. Dafür werden die in Abbildung 26 vorgestellten Themenbereiche untersucht.



Abbildung 26: Auswahl der Themenbereiche im Stand der Technik

Der erste Teil befasst sich mit integrierten Ansätzen aus dem Bereich Simultaneous bzw. Concurrent Engineering und der integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung. Hier stehen vor allem die Prozesse mit unterstützenden Methoden im Vordergrund. Die organisatorischen Aspekte werden kurz angesprochen, jedoch nicht weiter vertieft.

Im zweiten Teil liegt der Fokus auf der Auswahl von Lösungen als eine zentrale Tätigkeit während der Entwicklung. Es werden etablierte Methoden zu Auswahl von Produktlösungen, Fertigungsverfahren und -anlagen sowie Materialien vorgestellt.

Im letzten Teil wird schließlich auf ökologische, technische und wirtschaftliche Bewertungsmethoden eingegangen. Die Auswahl der präsentierten Methoden ist auf die Anforderungen dieser Arbeit zugeschnitten.

Die auf der vorherigen Seite genannten Themenbereiche decken den Stand der Technik ab mit denen die Kernpunkte der Arbeit in Berührung kommen. Dazu werden existierende Ansätze vorgestellt und in Kapitel 5 nach entsprechenden Kriterien analysiert.

4.1 Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering

Im Rahmen dieser Arbeit ist die übergreifende Entwicklung von Produkt und Produktionssystem in Kombination mit der Materialauswahl ein zentraler Punkt. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle bestehende Ansätze aus dem Bereich des Simultaneous bzw. Concurrent Engineering untersucht. Dabei sollen zunächst allgemeine Ansätze in dem Themengebiet vorgestellt werden. Simultaneous Engineering wird in diesem Kapitel getrennt von der integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung aufgeführt, auch wenn der Übergang zwischen beiden Bereichen fließend ist. Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung (Kapitel 4.2) kann als modernerer Begriff angesehen werden, der eine stärkere methodische Integration verfolgt.

Laut Ehrlenspiel [Ehrl09] gehört das Simultaneous Engineering zu den Methoden der integrierten Produkterstellung. Bereits 1969 wurden erste Ansätze dazu entwickelt, obwohl das Thema erst in den 80er Jahren breiter in der Forschung und Wissenschaft diskutiert wird [ZhZh95].

Bevor sich Ansätze zum gleichzeitigen Ausführen verschiedener Entwicklungsaufgaben etablierten, erfolgte die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem in nacheinander folgenden und aufeinander aufbauenden Schritten [EBGK97]. In Abbildung 27 ist diese serielle Struktur dargestellt. Erst wenn das Wissen über die Gestalt vollständig ist, werden die Informationen in einem Vorgang an den nachgelagerten Prozess weitergegeben [WhCl92].

Diese stark sequentiell geprägte Struktur weist einige erhebliche Nachteile auf. Wenn sich in der Produktionssystementwicklung herausstellt, dass das in der Produktentwicklung erarbeitete Produkt nicht oder nicht unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen herstellbar ist, müssen die Produktmerkmale wieder geändert werden, was zu Zeitverzögerungen und Kostensteigerungen führt. Des Weiteren ist es schwierig, bestehende Produktionssysteme weiter zu verwenden oder optimale Maschinenparameter in der Produktion zu verwenden. [ZhZh95]

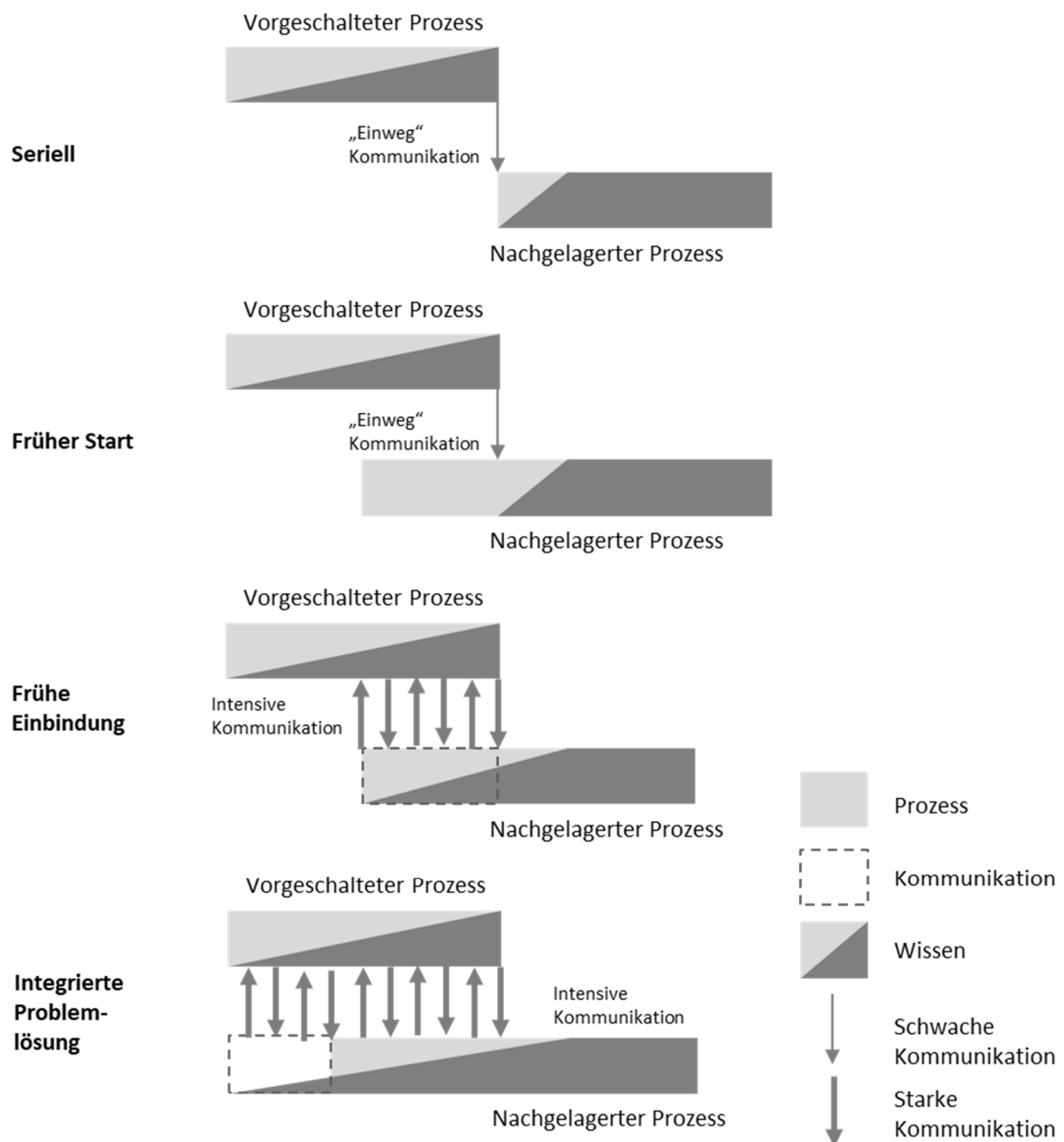


Abbildung 27: Vier Möglichkeiten der Kommunikation zwischen voneinander abhängigen Prozessen (in Anlehnung an [WhCI92])

Auch Umweltauswirkungen und Kosten sowie Qualität und die technische Wertigkeit können durch die sequentielle Abarbeitung negativ beeinflusst werden, da Produkt und Produktionssystem nicht optimal aufeinander abgestimmt entwickelt werden.

Um dieses Problem aus Prozesssicht zu adressieren, ist es notwendig, den nachgeschalteten Prozess (wie in Abbildung 27 dargestellt) nach vorne zu verlagern, um dadurch eine größere Überlappung mit dem vorgeschalteten Prozess zu erreichen. Dabei ist eine intensive Kommunikation notwendig, um Wissen aus dem vorgeschalteten Prozess an den nachgeschalteten Prozess zu

leiten, so dass dort die erforderlichen Kenntnisse erlangt werden um den Prozess zu beginnen. [WhCI92]

Aus organisatorischer Sicht ist der Einsatz von SE-Teams ein wichtiger Beitrag zur Integration verschiedener Fachbereiche im Simultaneous Engineering. Zu den Aufgaben von SE-Teams gehören z.B. die Koordination, Vorbereitung von Entscheidungen, die projektübergreifende Ressourcenplanung und das Konfliktmanagement. Dabei wird zwischen fest installierten und zeitweisen SE-Teams unterschieden. Nach Eversheim et al. besitzen die fest installierten Teams das größere Potenzial in Bezug auf die Regelmäßigkeit des Informationsaustausches, die gleiche Informationsbasis und die Berücksichtigung der Kenntnisse aller Abteilungen. Wichtige Kriterien für SE-Teams sind beispielsweise die Teamgröße, Teamorganisation und die Einbindung der Fachabteilungen. [EvBL95]

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden folgende Ansätze vorgestellt:

- Design for Manufacture and Assembly (DFMA)
- Referenzmodell für Simultaneous Engineering nach Eversheim et al.
- Concurrent Function Deployment nach Prasad
- Set-Based Concurrent Engineering (SBCE)

Design for Manufacture and Assembly (DFMA)

Das Design for Manufacture and Assembly (DFMA) wurde ursprünglich als Synonym für Concurrent Engineering gesehen und ermöglicht eine erste Integration von Produkt- und Herstellungsaspekten [ZhZh95].

Design for Manufacture and Assembly (DFMA) nach Boothroyd et al. [BoDK02] verfolgt die herstellungsgerechte Entwicklung von Produkten. Es setzt sich aus dem fertigungsgerechten Entwickeln (Design for Manufacture - DFM) und dem montagegerechten Entwickeln (Design for Assembly - DFA) zusammen. Im Rahmen des Concurrent Engineering sind die Unterweisung der Konstruktionsabteilung, fertigungs- und montagebezogene Kosten zu reduzieren, von großer Bedeutung. Daneben kann DFMA auch als Werkzeug zur Bestimmung von Schwierigkeiten bei der Fertigung und Montage sowie der Zielkosten und zur Unterstützung bei Verhandlungen mit Zulieferern eingesetzt werden. Die allgemeine Vorgehensweise von DFMA in Kombination mit geeigneten Softwaretools (wie beispielsweise die DFMA Tools aus [www3]) kann Abbildung 28 entnommen werden. [BoDK02]

Ausgehend von dem Konzept werden in der DFA-Phase Vorschläge erarbeitet, die die Produktstruktur vereinfachen sollen, um Montagevorgänge zu reduzieren. Im Anschluss erfolgt die Auswahl der zur Realisierung notwendigen Materialien und Prozesse in Kombination mit einer Kostenschätzung. Daraus können Ansatzpunkte für wirtschaftlichere Materialien und Prozesse abgeleitet werden, die wiederum in die Überarbeitung des Konzeptes einfließen. Die anschließende DFM-Phase berücksichtigt während der Detailentwicklung die Minimierung der Herstellungskosten. [BoDK02]

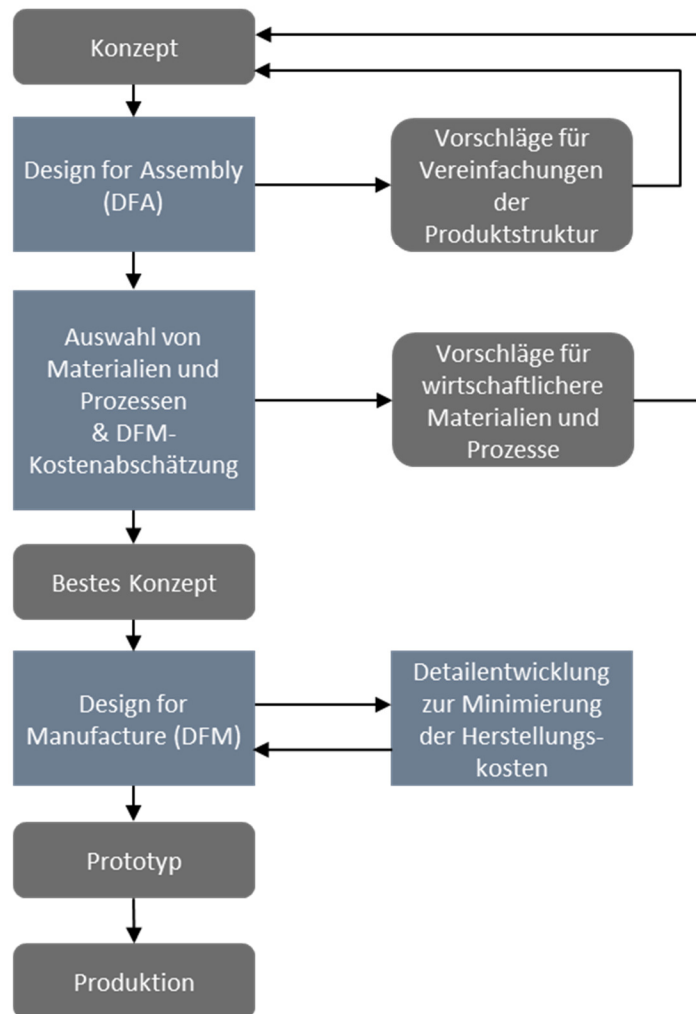


Abbildung 28: Allgemeine Vorgehensweise von DFMA mithilfe von DFMA-Software (in Anlehnung an [BoDK02])

Zur Berücksichtigung von Herstellungsaspekten in der Entwicklung stellen Boothroyd et al. [BoDK02] verschiedene Konstruktionsrichtlinien für diverse Montage- und Fertigungstechnologien vor.

Der DFMA-Ansatz berücksichtigt bei der Produktentwicklung Herstellungs- und Materialaspekte. Ausgehend von einem ersten Produktentwurf werden Verbesserungen, die aus der Analyse des

Produktes abgeleitet werden, angewandt. Der Prozess weist daher einen stark iterativen Charakter auf. Methoden zur fertigungs- und montagegerechten Produktgestaltung werden innerhalb des DFMA eingesetzt.

Referenzmodell für Simultaneous Engineering nach Eversheim et al.

Eversheim et al. stellen in [EBGK97] ein Referenzmodell vor, das eine Integration von Konstruktion und Prozessplanung begünstigt. Es ist essentiell, die Abhängigkeiten zwischen den Elementen der beiden Entwicklungsprozesse zu identifizieren. Mit diesen Erkenntnissen lassen sich aufeinander aufbauend eine aktivitätenorientierte, objektorientierte und informationsorientierte Integration erreichen. Dabei sind die Informationen und der Austausch dieser von besonderem Interesse. [EBGK97]

Aktivitätenorientiert meint eine parallele Ausführung von Entwicklungstätigkeiten. Dabei werden Methoden wie QFD, FMEA und DFMA eingesetzt, um Informationen zwischen parallelen Aktivitäten auszutauschen. Objektorientierte Parallelisierung bezeichnet die gleichzeitige Bearbeitung von verschiedenen Aufgaben an einem technischen System (Modul, Baugruppe). Die Speicherung von Informationen in einem Datenaustauschformat begünstigt dieses Vorhaben. Die informationsorientierte Parallelisierung adressiert eine Verbesserung des Informationsflusses zwischen den integrierten Methoden. [EBGK97]

Zur Untersuchung der Abhängigkeit von Informationen innerhalb der Aktivitäten, Methoden und technischen Systeme werden Relationsmatrizen (siehe Abbildung 29) eingeführt. Die Aktivitäten-Informationen-Matrix (AIM) beschreibt bei welchen Aktivitäten welche Informationen benötigt und generiert werden. Die Technische-System-Informationen-Matrix (TIM) weist den Elementen des Systems (Komponente, Teil, Zusammenbau usw.) Informationen zu. Die Methoden-Informationen-Matrix (MIM) beinhaltet welche Informationen bei welchen Methoden benötigt und generiert werden. Eine weitere Matrix, die Informationen-Abhängigkeiten-Matrix (IAM), beschreibt welche Informationen aus Konstruktion und Prozessplanung voneinander abhängen oder koordiniert werden. [EBGK97]

Diese Matrizen bilden die Grundlagen für ein Rahmenwerk und ermöglichen die Entwicklung von neuen Planungs- und Ausführungsmethoden, mit dem Ziel einer besseren Integration verschiedener Tätigkeiten. Dazu zählen beispielsweise die Methode zur Identifikation von Koordinationspunkten zwischen Konstruktion und Prozessplanung oder die Methode zur Übermittlung von

Konstruktionsinformationen zur Prozessplanung in frühen Phasen der Entwicklung nach Eversheim et al. [EBGK97]

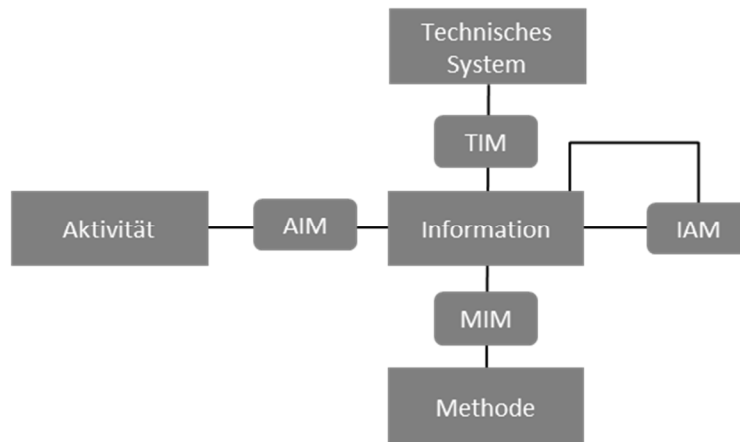


Abbildung 29: Informationen als zentrales Objekt im Rahmen einer gleichzeitigen Entwicklung von Produkt und Prozess (in Anlehnung an [EBGK97])

Dieser Ansatz stellt nicht unbedingt ein Vorgehensmodell für Simultaneous Engineering dar, sondern untersucht vor allem die zugrundeliegenden Beziehungen zwischen Konstruktions- und Prozessplanungsprozessen. Daher kann er als wichtige Grundlage für die Entwicklung weiterer Ansätze gesehen werden.

Concurrent Function Deployment nach Prasad

Zur methodischen Unterstützung des Concurrent Engineering wurde das Concurrent Function Deployment (CFD) von Prasad entwickelt und in [Pras96] und [Pras97] erstmals vorgestellt. Mithilfe dieses Werkzeugs lassen sich aus den Anforderungen und Randbedingungen Produkt-, Prozess- und Produktionsmerkmale für verschiedene Kriterien (Qualität, Kosten, Herstellbarkeit, allgemein X-ability) aufstellen. Ausgehend von den Anforderungen werden verschiedene House of Value (HOV, allgemeineres Verständnis des House of Quality für die Berücksichtigung verschiedener Kriterien, nicht nur Qualität) gleichzeitig verwendet, um basierend auf den Anforderungen die relevanten Merkmale für verschiedene Kriterien aufzustellen. Dieser Vorgang wird für die einzelnen Ausprägungen der Kriterien (z.B. für Qualität als Kriterium: System, Komponente, Teil, Material) parallel durchgeführt. Das beschriebene Vorgehen wird für die verschiedenen Stufen Produktplanung, Prozessplanung und Produktionsplanung nacheinander mit einer Überlappung durchgeführt. [Pras96, Pras97]

In [Pras96], [Pras97] und [Pras00] wird die Methode im Detail vorgestellt. Die CFD-Methode zielt auf eine integrierte Entwicklung unter verschiedenen Kriterien ab, jedoch werden die Stufen Produkt, Prozess und Produktion eher sequentiell abgearbeitet.

Set-Based Concurrent Engineering (SBCE)

Das Set-Based Concurrent Engineering ist durch die Verwendung von Lösungsmengen und der daraus resultierenden Flexibilität — auch bezüglich Unsicherheiten — für eine fachbereichsübergreifende Entwicklung mit frühen Bewertungsschritten sehr interessant.

Seinen Ursprung hat der Ansatz in japanischen Automotive-Unternehmen wie beispielsweise Toyota, die das Ziel verfolgen, Produkte schneller als ihre Konkurrenten auf den Markt zu bringen. Im Gegensatz zu einer frühen Auswahl von Lösungen (Point-Based Engineering), wird mit Lösungs-Sets, also einer Menge an möglichen alternativen Lösungen, gearbeitet. [WLSC94]

Obwohl dieser Ansatz in japanischen Unternehmen bereits seit längerem etabliert ist, findet eine wissenschaftliche Erwähnung erstmals in den späten 80er Jahren durch Ward und Seering in [WaSe89a] und [WaSe89b] statt. Ward et al. und Sobek et al. führen die Beschreibung dieses Ansatzes in [WLSC94] und [SoWL99] fort.

Konventionelle Entwicklungsprozesse bestehen aus sequentiellen Prozessschritten, die iterativ durchlaufen werden. Nach der Problemlösung wird eine Lösung entwickelt und anschließend analysiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt dann eine Modifikation oder sogar Neuentwicklung. [WLSC94]

Nach Sobek et al. [SoWL99] besteht die Concurrent Engineering Umsetzung in vielen westlichen Ländern aus einer Verfeinerung und Adaption von sequentiellen Prozessen und nicht aus revolutionären Ansätzen.

Set-Based Concurrent Engineering arbeitet hingegen mit einer Menge verschiedener alternativer Lösungen (Sets). Entscheidungen werden so spät wie möglich getroffen, um flexibler auf Änderungen reagieren zu können. Die Lösungsmenge wird nach und nach im fortschreitenden Entwicklungsprozess eingeschränkt. [WLSC94, SoWL99]

Bernstein veranschaulicht diesen Vorgang in [Bern98] (siehe Abbildung 30). Die verschiedenen Fachgebiete (1) haben mögliche Lösungen ausgewählt, um die Anforderungen zu erfüllen. Diese Lösungsmengen müssen erweitert werden (2), um Anknüpfungspunkte zu benachbarten Fachgebieten zu erreichen. Im Anschluss erfolgt die Suche nach weiteren Lösungen, die die Anforderungen aller Fachgebiete erfüllen (3), also innerhalb der Schnittmenge liegen. Lösungen, die sich

außerhalb der Schnittmenge befinden, können nun nach und nach eliminiert werden (4). Am Ende dieser schrittweisen Eingrenzung bleibt schließlich eine Lösungskombination übrig (5). [Bern98]

Die Betrachtung von Lösungsmengen ist die Basis einer kooperativen, integrierten Entwicklung und ermöglicht eine gewisse Flexibilität bezüglich Änderungen [WLSC94].

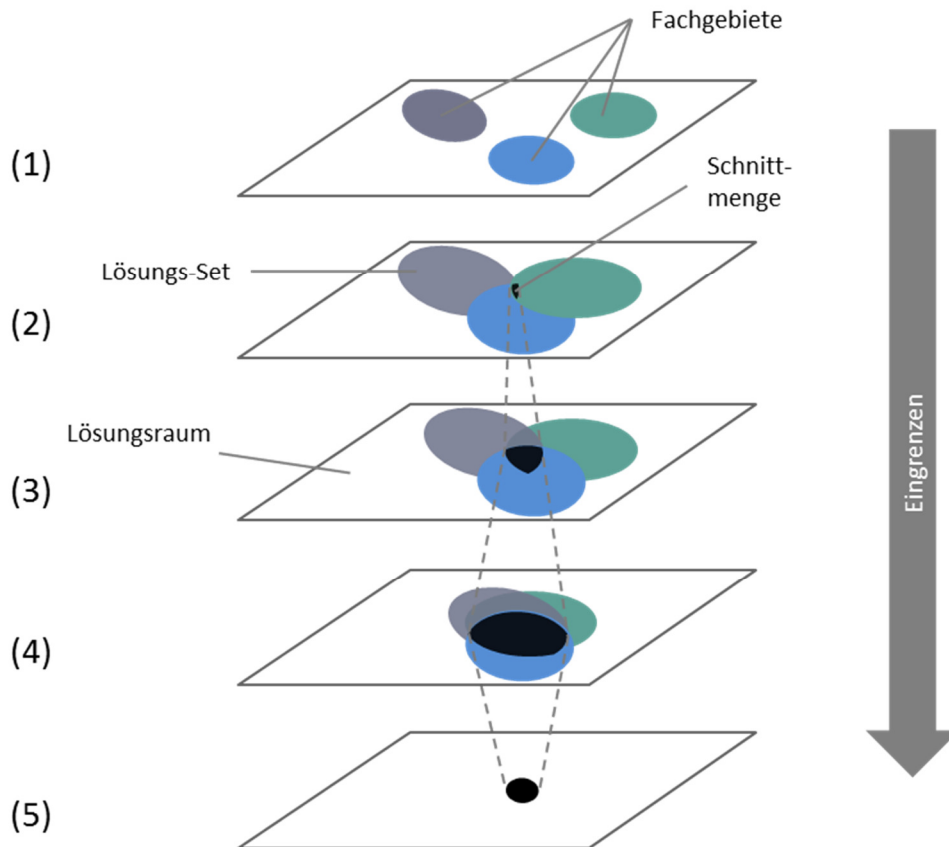


Abbildung 30: Eingrenzen der möglichen Lösungen im Set-Based Concurrent Engineering (in Anlehnung an [Bern98])

Der SBCE-Ansatz basiert auf der Verwendung von Lösungsmengen, die während des Entwicklungsprozesses angenähert und schließlich eingeschränkt werden. Dadurch wird eine integrierte Entwicklung ermöglicht, die verschiedenen Fachbereiche einschließt und eine verzögerte Entscheidung ermöglicht, welche zu einer größeren Robustheit von Produkt und Prozess führt.

4.2 Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung

In diesem Kapitel werden Ansätze vorgestellt, die die integrierte Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem verfolgen.

Wie schon in Kapitel 4.1 erwähnt, decken sich viele Aspekte der integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung mit denen des Simultaneous Engineering. Der Begriff *Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung* ist eher etwas moderner anzusehen und verfolgt die methodische Integration.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden folgende Ansätze vorgestellt:

- Integrierter Produktentwicklungsprozess nach Andreasen und Hein
- Methodik zur integrierten Produkterstellung nach Ehrlenspiel
- Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung nach Eversheim et al.
- Kooperatives Produkt-Engineering nach Gausemeier et al.
- Integrative Entwicklung nach Gausemeier et al.
- Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach Nordsiek
- Systematik für die integrative Konzipierung der Montage nach Brandis
- Kombinierte Werkstoff-, Fertigungsverfahren- und Geometriesynthese nach Benders
- Funktions- und Prozessmodell für integrierte Produkt- und Produktionssystemplattformen nach Michaelis et al.

Integrierter Produktentwicklungsprozess nach Andreasen und Hein

Eine übergreifende Entwicklung erfordert die Integration der verschiedenen zur Produkterstellung notwendigen Entwicklungsphasen. Der integrierte Produktentwicklungsprozess nach Andreasen und Hein [AnHe00] liefert ein solches Prozessmodell.

Andreasen und Hein stellen in [AnHe00] fest, dass vor allem durch die Expansion von Unternehmen eine zunehmende Trennung und Unterteilung von Aufgaben stattfindet. Diese Unterteilung wird durch die Nachfrage nach Spezialisierung, eine aufgrund zeitlicher Randbedingungen notwendige Aufgabenteilung und den Bedarf von Serviceeinrichtungen begründet. Sie beeinflusst die Bedingungen, unter denen die Aufgaben in der Produktentwicklung durchgeführt werden. Die Aktivitäten zerfallen aus diesem Grund in kleine Teilaufgaben. Dadurch werden die Richtung,

die Effizienz, der Aufwand und die Professionalität des Entwicklungsprozesses negativ beeinflusst. Andreasen und Hein sehen in der Integration von Methoden und Prozessen und nicht von Organisationseinheiten die Lösung für diese Problematik. [AnHe00]

Ein idealisierter integrierter Entwicklungsprozess (siehe Abbildung 31) beinhaltet eine parallele Bearbeitung der drei Disziplinen Marketing/Verkauf, Entwicklung/Konstruktion und Produktetablierung/Produktion. [AnHe00]

Andreasen und Hein [AnHe00] beschreiben in ihrem Ansatz ein idealisiertes paralleles Vorgehensmodell für die Entwicklung von Produkt und Prozess. Die Autoren gehen jedoch nicht auf eine integrierte Auswahl und Bewertung ein.

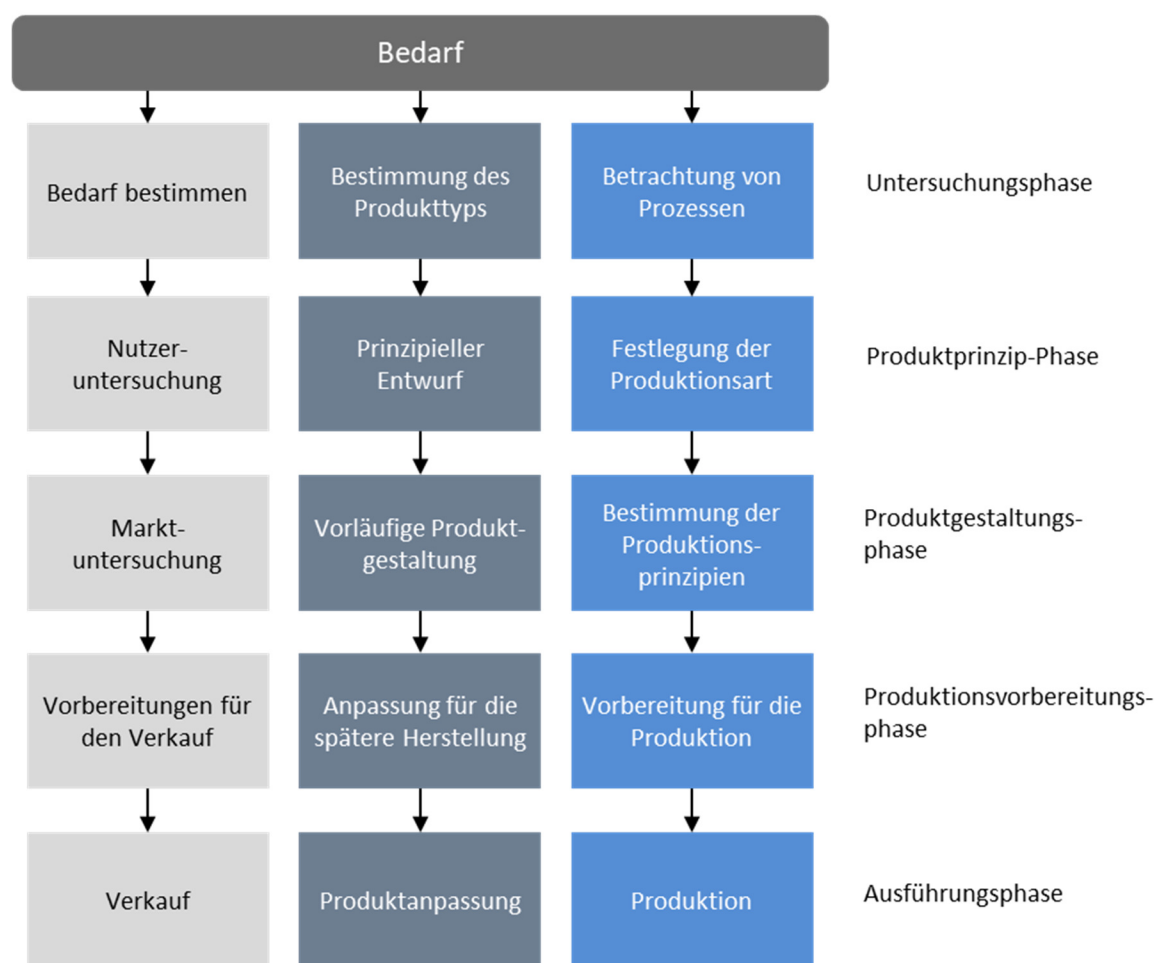


Abbildung 31: Integrierter Produktentwicklungsprozess nach Andreasen und Hein (in Anlehnung an [AnHe00])

Methodik zur integrierten Produkterstellung nach Ehrlenspiel

Ehrlenspiel präsentiert in [Ehrl09] eine Methodik zur integrierten Produkterstellung (IPE-Methodik). Diese adressiert die aufgrund der zunehmenden Komplexität von Produkten und Produktionsprozessen relevante Zusammenführung von Personen mit ihren Informationen. Simultaneous Engineering oder Qualitätsmanagement sind Beispiele für integrierende Vorgehensweisen, die aus Einzelmethoden (z.B. Teamarbeit) bestehen. Ehrlenspiel unterscheidet bei Arten und Methoden der Integration zwischen persönlicher (z.B. gemeinsames Wollen), informatorischer (z.B. Target Costing) und organisatorischer (z.B. Simultaneous Engineering) Integration. [Ehrl09] Weitere Informationen zu den Arten und Methoden der Integration können [Ehrl09] entnommen werden.

Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung nach Eversheim et al.

Eversheim et al. präsentieren in [EvSA05] ein weiteres integriertes Prozessmodell, das den Einsatz verschiedener Methoden berücksichtigt.

Das in Abbildung 32 dargestellte Rahmenkonzept für eine integrierte Produkt- und Prozessentwicklung nach [EvSA05] besteht aus zwei Hauptphasen, der integrierten Produktdefinition und Technologieplanung sowie der integrierten Produkt- und Produktionsprozessgestaltung, die vor allem die frühen Entwicklungsphasen fokussieren. Eine entsprechende Organisation und ein übergreifendes Informationsmanagement (PLM) begründen das Grundgerüst für diesen Ansatz. Die Einbindung verschiedener Unternehmensbereiche durch interdisziplinäre Simultaneous-Engineering-Teams stellt beispielsweise eine organisatorische Maßnahme dar. [EvSA05]

Der integrierte Entwicklungsprozess beginnt mit der integrierten Produktdefinition und Technologieplanung, in der die Kunden- und Marktanforderungen mit den technologischen Innovationen zusammengeführt werden. Die integrative Qualitätsplanungssystematik definiert und überprüft die Merkmale des Produktes und steht somit im ständigen Austausch mit der Konstruktion. Eine Produktstruktur, die Bauteilgestalt und die korrespondierenden Fertigungstechnologien stellen die Ergebnisse dieser Phase dar. [EvSA05]

In der darauffolgenden integrierten Produkt- und Produktionsprozessgestaltung werden Produkt und Produktionsprozess integrativ detailliert. Dabei ermöglicht die Identifikation und Ausnutzung von potenziellen Abhängigkeiten zwischen beiden Bereichen eine Erhöhung des Reifegrads beider Lösungen und begünstigt Verbesserungen bestimmter Randbedingungen wie beispielsweise der Kosten. Durch die Bewertung alternativer Fertigungstechnologieketten (z.B. nach

[Fall00]) lassen sich die Konstruktionsergebnisse absichern. In Abhängigkeit des Innovationsgrads der eingesetzten Technologien ist es möglich, bestehende Produktionskonzepte zu adaptieren, oder notwendig, neue Produktionskonzepte zu erarbeiten. Aus der Gestaltungsphase resultieren schließlich das Produkt und die Produktionsstruktur mit den entsprechenden Produktionsprozessen. Der gesamte Prozess wird durch übergreifende Methoden unterstützt, von denen die wichtigsten im nächsten Abschnitt aufgezählt werden. [EvSA05]

In [PfCa05] werden verschiedene Methoden für eine integrierte Produktdefinition und Technologieplanung vorgestellt. Eine Anpassung bereits existierender Methoden wie z.B. QFD, FMEA, Target Costing, Axiomatic Design oder Fehlerbaumanalyse durch eine Reduzierung der Komplexität und der Bereitstellung und Verwendung unternehmensübergreifender unscharfer Daten ermöglicht eine methodische Unterstützung. Diese Methoden werden durch ein durchgängiges Datenmanagement in Produkt- und Produktionssystementwicklung [BrWB05] und ein Fertigungstechnologieinformationssystem für die Produktentwicklung [EKSK05] ergänzt.

Außerdem ist eine frühe Absicherung der Konstruktionsergebnisse auf Basis der Bewertung alternativer Fertigungstechnologien sinnvoll [EvSA05].

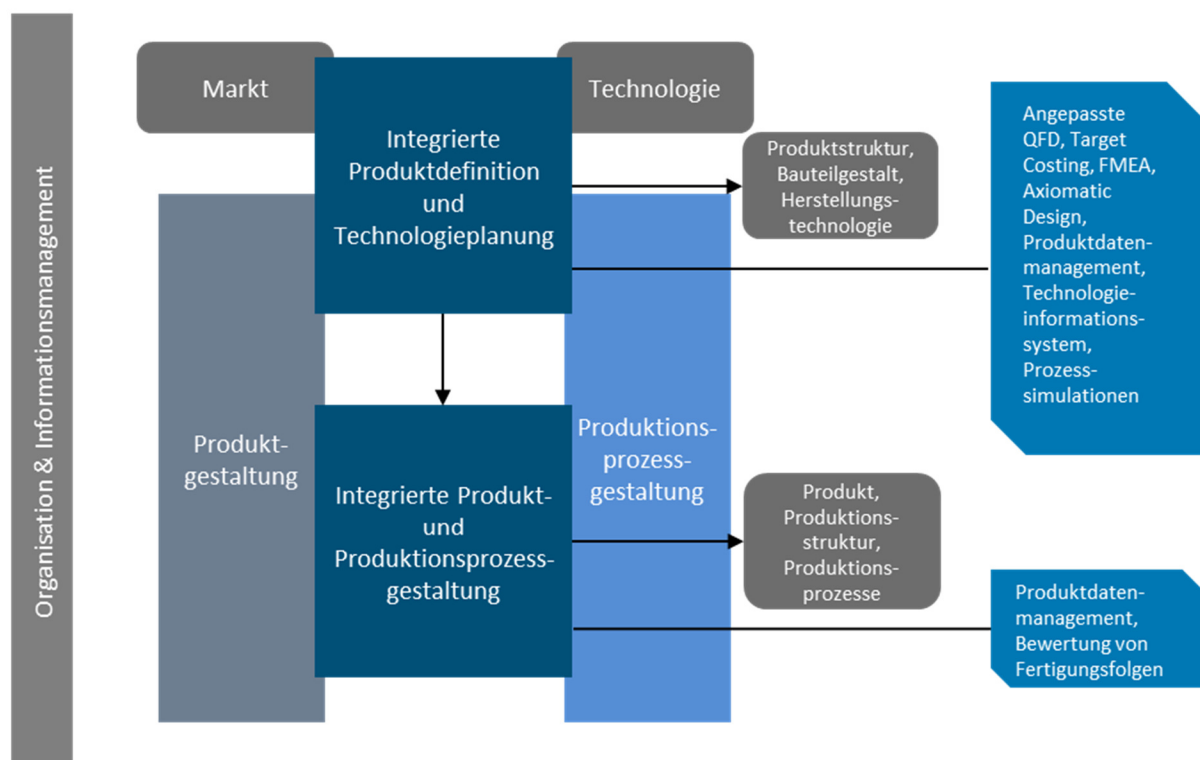


Abbildung 32: Rahmenkonzept einer integrierten Produkt- und Prozessgestaltung nach Eversheim et al. (in Anlehnung an [EvSA05])

In der integrierten Produkt- und Produktionsprozessgestaltung erfolgt eine Bewertung von potenziellen Fertigungsfolgen, um die Realisierbarkeit möglicher Produktmerkmale durch entsprechende Betriebsmittel zu evaluieren [BKWM05].

Eversheim et al. führen neben der klassischen Produkt- und Prozessgestaltung zusätzliche integrierte Entwicklungsschritte ein. Diese unterstützen, ausgehend von Markt und Technologie, die parallele Entwicklung von Produkt und Prozess. Innerhalb der integrierten Entwicklungsschritte werden angepasste klassische Methoden eingesetzt, die um integrierte Methoden (z.B. die Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung nach Fallböhmer [Fall00], siehe Kapitel 4.5) ergänzt werden.

Kooperatives Produkt-Engineering nach Gausemeier et al.

Das Kooperative Produktengineering nach Gausemeier et al. [GLRW00] ist ein Ansatz, der die Aktivitäten der beiden Bereiche Produkt- und Prozessentwicklung mit der strategischen Geschäftsplanung verbindet. Es soll eine gemeinsame Grundlage geschaffen werden, um das Unternehmen wettbewerbsfähiger zu gestalten. Faktoren wie z.B. Märkte, Branchen sowie Produkt- und Fertigungstechnologien haben dabei einen großen Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit und können durch geeignete Methoden adressiert werden. Die wesentlichen Tätigkeitsbereiche des kooperativen Produktengineering sind die sich in Abbildung 33 überschneidenden Bereiche. [GLRW00]

Die Strategische Produktentwicklung fokussiert die Entwicklung von für das Unternehmen erfolgreichen Produkten und Dienstleistungen, während die strategische Prozessentwicklung auf die Entwicklung produktionstechnischer Kernkompetenzen abzielt. Bei der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung steht die ablauforganisatorisch integrierte Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben im Vordergrund. Eine Integration aller am Erfolg des Unternehmens beteiligten Bereiche ist nur durch eine langfristigste Kooperationsbasis zu erreichen. [GLRW00]



Abbildung 33: Kooperatives Produkt-Engineering (in Anlehnung an [GLRW00])

Integrative Entwicklung nach Gausemeier et al.

Gausemeier und Plass stellen in [GaPl14] ein Rahmenwerk für die integrierte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem vor. Die in Abbildung 34 dargestellte Vorgehensweise ist durch die drei Zyklen strategische Produktplanung, Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung, die sich gegenseitig beeinflussen, gekennzeichnet. Der Entwicklungsprozess beginnt mit der Potenzialfindung innerhalb der strategischen Produktplanung, in der mögliche Potenziale und Handlungsfelder identifiziert werden. Darauf aufbauend erfolgt die Generierung neuer Produkt- und Dienstleistungsideen. In der Geschäftsplanung werden der Geschäftsplan sowie die Produktstrategie festgelegt. [GaPl14]

Die in der Produktplanung erarbeiteten Ergebnisse fließen in die anschließende Produktentwicklung ein. Die Produktkonzipierung stellt daraufhin Funktionsstrukturen auf und wählt prinzipielle Lösungen, die die Funktionen erfüllen, aus. Die Ausgestaltung der einzelnen Komponenten findet in den jeweiligen Domänen statt. Abschließend werden diese zu einem fertigen Produkt integriert. [GaPl14, GaBR10]

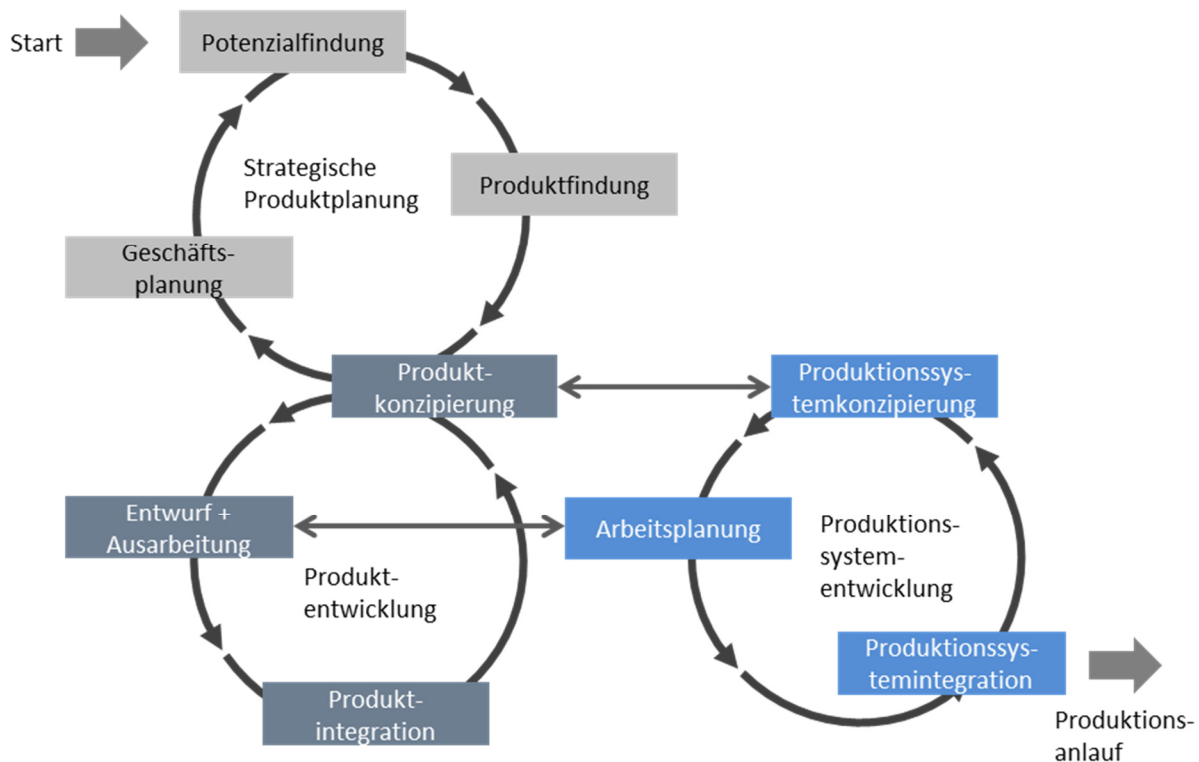


Abbildung 34: Integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem nach Gausemeier und Plass (in Anlehnung an [GaPl14])

Im dritten Zyklus erfolgt die Entwicklung des Produktionssystems. Analog zur Produktkonzipierung, werden in der Produktionssystemkonzipierung, prinzipielle Lösungen des Produktionssystems aufgestellt. Diese werden in der darauffolgenden Arbeitsplanung konkretisiert und schließlich zu einem fertigen Produktionssystem integriert. [GaPl14, GaBR10]

Die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem erfolgt dabei in einem engen Zusammenspiel, in dem die Konzeptionierung und die Konkretisierung parallel zueinander ausgeführt werden. Aufbauend auf den prinzipiellen Lösungen des Produktes erfolgt die Konzeptphase des Produktionssystems. [GaBR10]

In [GaBR10] und [Reye10] wird, basierend auf dem gerade vorgestellten Ansatz zur methodischen Unterstützung der integrierten Entwicklung, eine Spezifikationstechnik nach [GFDK09] für die Beschreibung mechatronischer Produkte und Produktionssysteme verwendet. Die Produktionssystemkonzipierung ist maßgeblich abhängig von den Anforderungen, der Struktur und der Form des Produktes und resultiert in einer Gebäudestruktur. [Reye10, GaBR10]

Ausgehend von diesen Randbedingungen und der prinzipiellen Lösung des Produktes werden erste Herstellungs- und Montageprozesse im Rahmen einer Prozesskette erarbeitet. Die Prozess-

kette bildet die prinzipielle Lösung des Produktionssystems, in der jeder Prozess durch eine Herstellungsfunktion repräsentiert und durch eine Fertigungstechnologie konkretisiert wird. Unter Herstellungsfunktionen versteht Reyes-Peréz die Hauptgruppen und Gruppen der Fertigungsverfahren nach der DIN 8580 [DIN8580]. Zur optimalen Prozessauswahl müssen verschiedene potenzielle Prozessketten entwickelt und evaluiert werden. Anschließend können den Prozessen Ressourcen zugeordnet werden. Durch die Ressourcen erhält das Produktionssystem seine Form und kann schließlich realisiert werden. [Reye10, GaBR10]

Der Ansatz beschreibt eine parallele Entwicklung von Produkt- und Produktionssystem, in der die verschiedenen Phasen miteinander korrespondieren. Eine Spezifikationstechnik soll den Entwickler bei der Umsetzung unterstützen.

Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen nach Nordsiek

Gausemeier et al. und Nordsiek stellen in [GDKN11] und [Nord12] basierend auf dem Rahmenwerk von [GaPl14] einen detaillierteren Prozess für die integrative Entwicklung von Produkt und Produktionssystem mechatronischer Systeme vor (siehe Abbildung 35).

Der vorgestellte Prozess beginnt mit der Planung und Klärung der Aufgabe für das Produkt. Auf Basis dieser Ergebnisse, den Anforderungen, erfolgt die Konzipierung auf Systemebene, in der die Hauptfunktionen aufgestellt und zueinander angeordnet werden. Dazu werden potentielle Lösungen, die die Funktionen erfüllen, gesucht und mögliche Kombinationen evaluiert. Als Ergebnis erhält man prinzipiellen Lösungen auf Systemebene. Die anschließende Konzipierung auf Modulebene gliedert die erarbeiteten Systemlösungen in Module und ordnet diesen wiederum prinzipielle Lösungen zu. [GDKN11, Nord12]

Diese Phase korrespondiert mit der Planungsphase des Produktionssystems, da die Produktlösungen aus Wirkstruktur und Gestalt die Fertigungstechnologien beeinflussen und umgekehrt. Auf der Produktseite erfolgt abschließend die Integration zu einer Gesamtlösung. [GDKN11, Nord12]

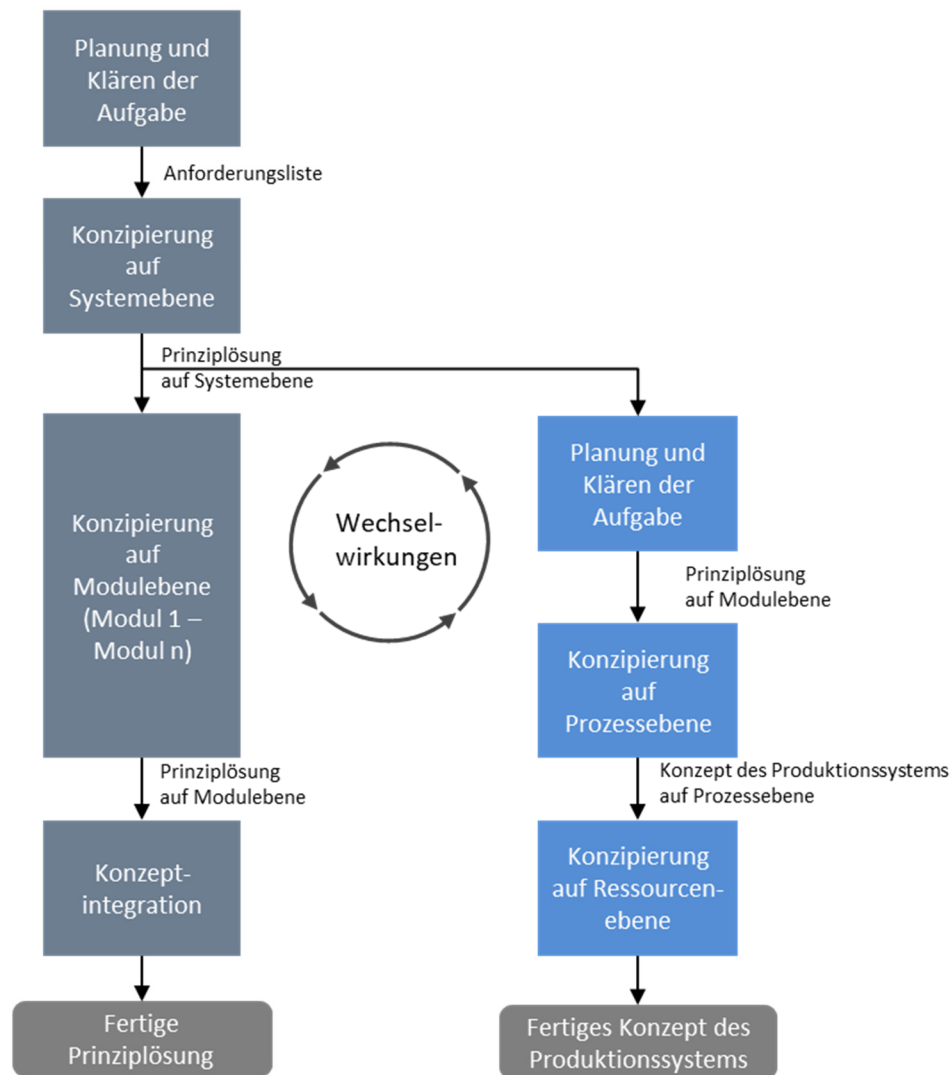


Abbildung 35: Vorgehensweise bei der integrativen Konzeptionierung von Produkt und Produktionssystem (in Anlehnung an [Nord12])

In der Planungsphase des Produktionssystems werden zunächst die für das Produktionssystem relevanten Anforderungen herausgefiltert. Außerdem erfolgt eine Untersuchung der modularen Struktur und der herstellungsorientierten Erzeugnisstruktur der Prinziplösung des Produktes auf Systemebene. Darauf basierend werden zwischen den Bauteilen und Baugruppen Montagevorgänge angesetzt. Den Bauteilen, die keine Zukaufteile sind, werden im Anschluss Fertigungstechnologien zugeordnet. Dieses Vorgehen korrespondiert mit der Konzipierung des Produktes auf Modulebene. Die vollständige Prozessstruktur stellt schließlich das Ergebnis der Prozessebene dar. [GDKN11]

Im darauffolgenden letzten Schritt werden einzelnen bzw. mehreren Prozessen jeweils Ressourcen zugeordnet. Die Auswahl der Ressourcen erfolgt dabei anhand der Produktionsanforderungen. Somit entsteht in dieser Phase ein vollständiges Konzept des Produktionssystems. [GDKN11]

Neben dem eigentlichen Vorgehensmodell umfasst der Ansatz von Nordsiek auch den Einsatz einer Spezifikationstechnik (nach [GFDK09]) und die Auswahl und Anpassung geeigneter Methoden, wie die Werkstoffauswahl nach Ashby [Ashb05] oder die Generierung alternativer Technologieketten nach Fallböhmer [Fall00]. [Nord12]

Der Ansatz nach Nordsiek präsentiert einen Entwicklungsprozess, der auf Basis des Systemkonzepts die integrierte Entwicklung von Produkt und Produktionssystem verfolgt. Aus der Struktur des Produktes werden Montagesequenzen in Kombination mit Fertigungsprozessen abgeleitet. Zur methodischen Unterstützung ist die Einbindung bereits existierender Methoden zur Prozess- und Materialauswahl eingeplant. Im Rahmen seiner Arbeit schlägt Nordsiek die Nutzwertanalysemethode nach [Zang14] zur Bewertung und Auswahl von Werkstoff und Fertigungstechnologie vor. Dieser Punkt wird jedoch nicht weiter vertieft.

Brökelman konzentriert seine Untersuchungen basierend auf [GaPl14] in [BGG12] auf strategische Betrachtungen bei der Produkt- und Produktionssystementwicklung. Der Fokus liegt hierbei auf der Auswahl geeigneten Produkt und Produktionsszenarien, im Besonderen auf der Wahl von entsprechenden Produkt-Produktionssystem-Kombinationen. Für dieses Vorhaben sollen existierende Beschreibungssprachen eingesetzt und spezielle Methoden entworfen werden. [BGG12]

Systematik für die integrative Konzipierung der Montage nach Brandis

Brandis erweitert den Ansatz von Nordsiek [Nord12] in [Bran14] auf die integrative Entwicklung von Produkt und Montageanlagen. Zum Umfang der Systematik gehören dabei ebenfalls der Einsatz einer Spezifikationstechnik nach [GFDK09] sowie die Einbindung angepasster bereits existierender Methoden, wie z.B. die Auswahl von Montageverfahren. Die montageorientierte Produktstrukturierung und die Spezifikation der Montageprozesse sind die Kernpunkte der Systematik. Dabei spielt die Verknüpfung von Produkt und Produktionssystem über die Verbindungsstellen eine zentrale Rolle. Innerhalb der Produktkonzipierung wird eine zur Baugruppenstruktur abweichende montageorientierte Struktur des Produktes erzeugt. Diese Struktur dient als Ausgangspunkt für die Entwicklung der Montageprozesskette. [GaBK10, Bran14]

Der weitere grundlegende Ablauf ist dem Ansatz nach [Nord12] aus Abbildung 35 ähnlich.

Kombinierte Werkstoff-, Fertigungsverfahren- und Geometriesynthese nach Benders

Der in [Bend11] präsentierte Ansatz von Benders erweitert durch eine kombinierte Werkstoff-, Fertigungsverfahren- und Geometriesynthese die integrierte Entwicklung um Werkstoffaspekte. Ausgehend von der Wirkstruktur des Produktes beginnt der in Abbildung 36 dargestellte Entwicklungsprozess mit der Ermittlung der für Geometrie, Werkstoff und Fertigung relevanten Anforderungen, welche maßgeblich durch die physikalischen Effekte bestimmt werden. [Bend11]

Im Anschluss erfolgt die Geometriesynthese. Zunächst werden alle Außengeometrien und Bauteilquerschnitte, die einen direkten Einfluss auf die Produktfunktionen aufweisen, festgelegt. Dabei wird zwischen Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen (Geometrie zwischen zwei Wirkflächenpaaren) nach [Matt02] unterschieden. In einem ersten Schritt werden die Wirkflächen gestaltet, da der Einfluss auf die Funktionserfüllung größer ist. Danach erfolgt die Leitstützstruktursynthese. Hier werden die Leitstützstrukturquerschnitte so gewählt, dass sie möglichst effizient Energien, Stoffe oder Signale zwischen den Wirkflächenpaaren leiten. Auf Basis der Geometrie lassen sich nun Fertigungsverfahrensketten zur Herstellung aufstellen. Als letzter Syntheseschritt erfolgt die Werkstoffauswahl. [Bend11]

In den verschiedenen Syntheseschritten wurden verschiedene Lösungen erarbeitet, die abschließend evaluiert werden. Eine ökologische, technische und wirtschaftliche Bewertung soll eine objektivere Auswahl der besten Lösung unterstützen. [Bend11]

Das Vorgehensmodell nach Bender bietet zusätzlich zwei alternative Wege im Entwicklungsprozess, je nach Hauptanforderung. Sollen vorhandene Fertigungsanlagen weiterverwendet werden, erfolgt nach der Leitstützstruktursynthese zuerst die Synthese der Verfahrensketten, dann die Werkstoffauswahl und abschließend die Querschnittssynthese. Liegt der Hauptfokus auf der Minimierung der Kosten, so wird zuerst die Werkstoffauswahl durchgeführt, dann werden die Fertigungsverfahren festgelegt und abschließend die Querschnitte bestimmt. Eine angepasste Anforderungsliste mit Anforderungsskizzen unterstützt den Entwickler beim Ermitteln der gestaltbestimmenden Anforderungen. [Bend11]

Das Elementmodell Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen nach [Matt02] wird bei der Geometriesynthese eingesetzt, um die Geometrie in Wirkflächen (für die Funktionserfüllung zuständig) und Leitstützstrukturen (Leiten von Energie, Stoffen und Signalen) zu zerlegen. Zur Gestaltung der Wirkflächen können Kataloge mit Kontaktgeometrien eingesetzt werden. Die Auswahl einer geeigneten Leitstützstruktur erfolgt mithilfe des morphologischen Kastens und Verträglichkeitsmatrizen. [Bend11]

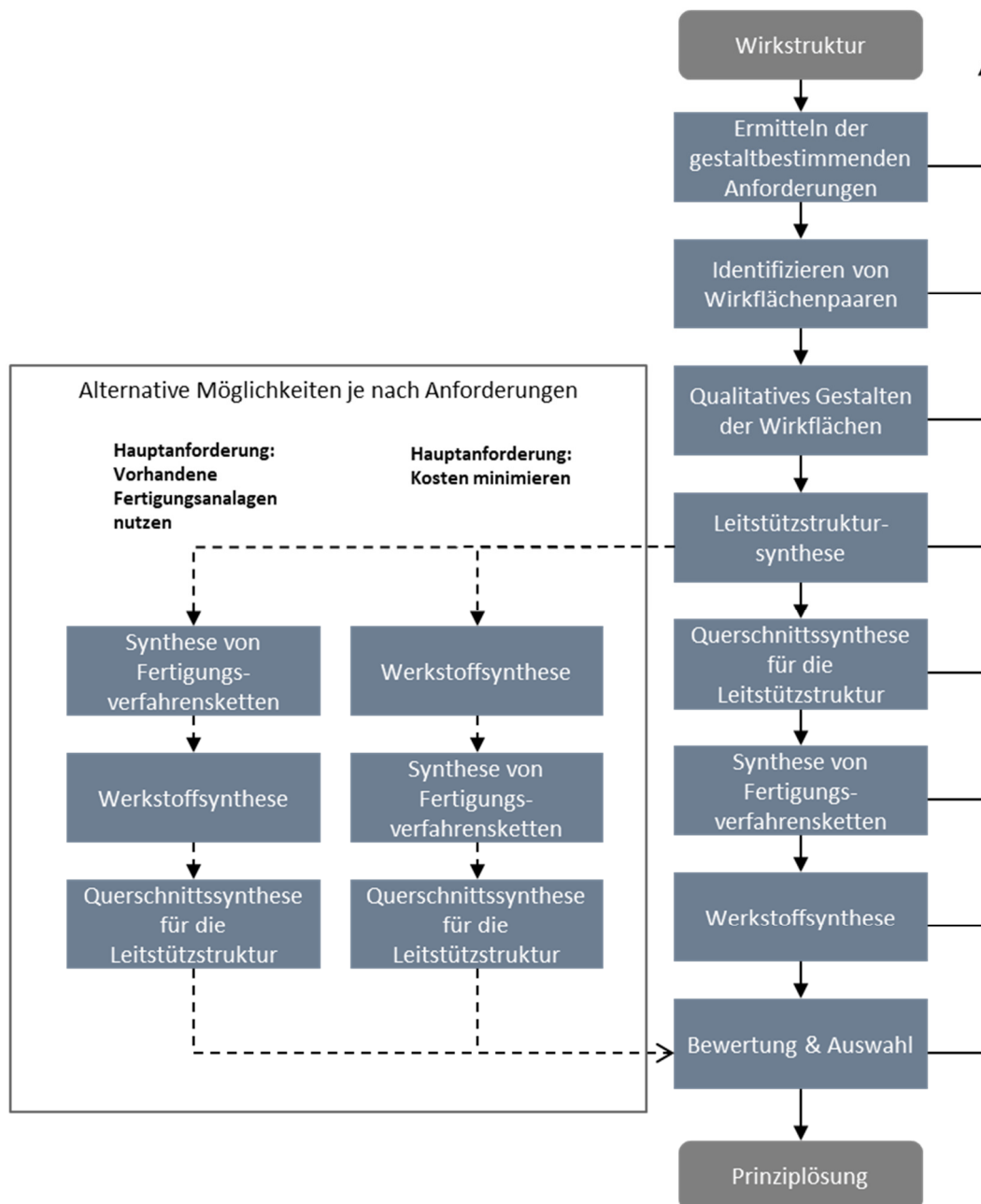


Abbildung 36: Kombierter Werkstoff-, Fertigungsverfahrens - und Geometriesyntheseprozess (in Anlehnung an [Bend11])

Bei der Festlegung eines geeigneten Querschnitts der Leitstützstruktur kommen diese Methoden ebenfalls zum Einsatz. Außerdem vereinfacht ein Querschnitts- und Bauweisenkatalog in Abhängigkeit der Funktion der Leitstützstruktur die Auswahl. Die Synthese der Fertigungsverfahrenketten erfolgt mithilfe von Katalogen mit Referenzverfahrenketten und Tabellen mit Einflüssen von Fertigungsverfahren auf den Werkstoff. Werkstoffdatenbanken, wie der CES (Cambridge Engineering Selector) [www4, Gran15] nach Ashby [Ashb05], werden bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe eingesetzt. Abschließend wird eine Bewertung aller Lösungsstränge (Kombinationen

aus Geometrie, Werkstoff und Fertigungsverfahren) nach technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und weiteren potenziellen Kriterien beispielsweise mithilfe einer Auswahlliste oder Nutzwertanalyse vorgenommen. Die gewichtete Summe der einzelnen Kriterien stellt schließlich das Ergebnis der Bewertung dar. [Bend11]

Die Bewertung wird in Kapitel 4.6.4 noch einmal aufgegriffen. Der Ansatz von Benders beginnt erst nachdem das Konzept bereits festgelegt ist. Außerdem betrachtet Benders ausschließlich Profile mit verschiedenen Querschnitten. Die anschließende Bewertung der Lösungen, ein zentraler Aspekt bei der Verwendung verschiedener Kombinationsmöglichkeiten, wird nur kurz angerissen und nicht näher spezifiziert.

Funktions- und Prozessmodell für integrierte Produkt- und Produktionssystemplattformen nach Michaelis et al.

Die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Objekten im Zusammenspiel von Produkt und Produktionssystem während der Entwicklung ist ein relevanter Baustein für ein tieferes Verständnis von möglichen Abhängigkeiten.

Michaelis et al. präsentieren in [MiJE15] ein Funktions- und Prozessmodell für integrierte Produkt- und Produktionssystemplattformen. Mithilfe einer funktionalen Modellierung wollen die Autoren konzeptionelle Überlegungen von Produkten und den dazugehörigen Produktionssystemen in Kombination mit den Prozessen festhalten. Auf Basis der konzeptionellen Daten ermöglicht das Modell in der Konzeptphase die Wiederverwendung und Anpassung von Komponenten, Maschinen, Fertigungsprozessen und Konstruktionslösungen auf konzeptioneller Ebene. [MiJE15]

Dazu beleuchtet das Plattformmodell das Aufeinandertreffen von Lösungsmöglichkeiten eines Produkts, das hergestellt werden soll, und den Lösungsmöglichkeiten des daran beteiligten Produktionssystems innerhalb des Lebenszyklus. Zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen diesen Elementen wurde die Methode Function-Means Trees von Malmqvist [Malm97] weiterentwickelt (siehe Abbildung 37). [MiJE15]

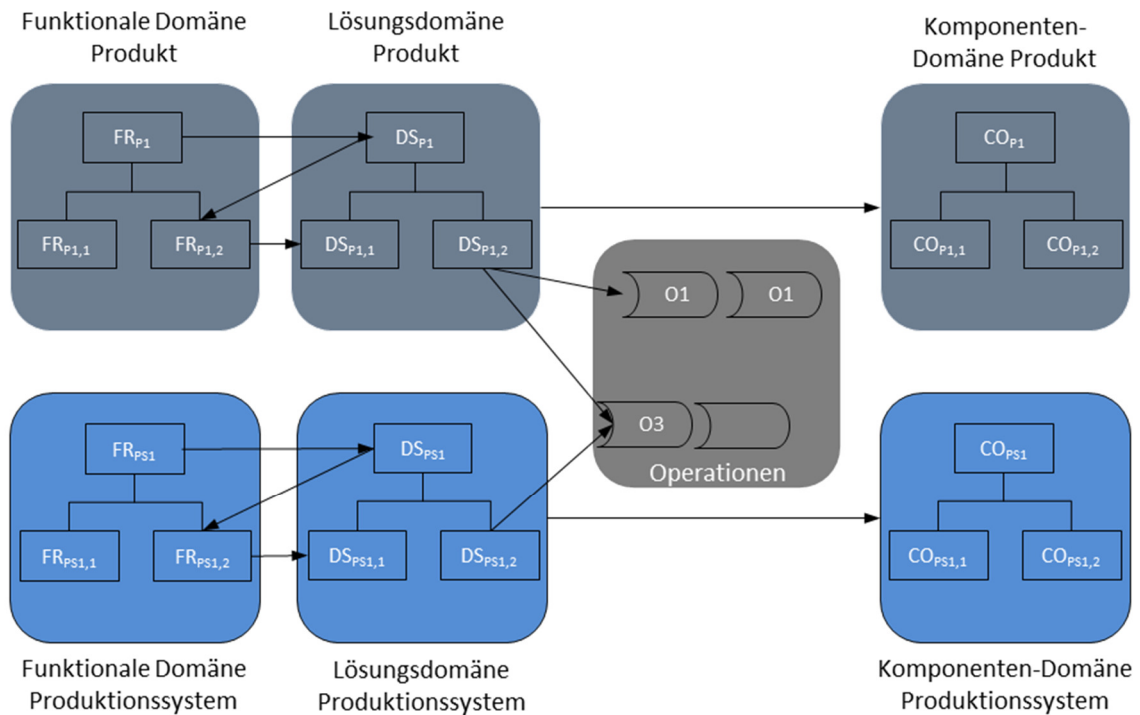


Abbildung 37: Zusammenhänge zwischen Produkt und Produktionssystem nach Michaelis et al. (in Anlehnung an [MiJE15])

Funktionale Anforderungen, Lösungsmöglichkeiten, Komponenten und Operationen sind die zentralen Objekte bei der Beschreibung der Zusammenhänge (siehe Abbildung 37). Die funktionalen Anforderungen (FR_P) des Produktes (z.B. Befestigung ermöglichen) und des Produktionssystems (FR_{PS}) (z.B. Gewinde herstellen) werden jeweils durch die Lösungsmöglichkeiten (DS_P) (z.B. Gewindelöcher) und (DS_{PS}) (z.B. Gewindebohrer) erfüllt. Komponenten (CO_P und CO_{PS}) (z.B. Platte mit Loch und Gewindebohrstation) konstituieren die Lösungsmöglichkeiten beider Systeme. Die Lösungsmöglichkeiten von Produkt und Produktionssystem werden dabei über die Operationen (OP) (z.B. Gewinde bohren) miteinander verknüpft. [MiJE15]

Der Ansatz ist dem des Axiomatic Designs ähnlich, unterscheidet sich aber durch die Operationen, über die die Lösungen von Produkt und Produktionssystem miteinander verknüpft werden. Im Fokus stehen dabei die Zusammenhänge der Maschinen innerhalb des Produktionssystems, die sehr detailliert und konkret beschrieben werden.

Das integrierte *Produkt- und Prozess-Engineering* (IPPE) ist eine Softwarelösung der Firma SAP, die die übergreifende Dokumentation der Produkt-, Prozess- und Fabrikstruktur in einem übergreifenden Modell ermöglicht. Eine gemeinsame Datenbank ermöglicht das zeitlich versetzte Bearbeiten von gemeinsamen Arbeitsschritten. [Kohl05]

Pape und Mantwill präsentieren in [PaMa13] einen Ansatz, der die bauteilbezogenen Energieaufwände, basierend auf CAD-Daten und Datenbanken, visualisiert. Um Konstruktionsentscheidungen hinsichtlich des Energieaufwandes in der Produktion treffen zu können, ist es wichtig die Zusammenhänge zu verstehen. Die energetische Kausalverkettung berücksichtigt die Auswirkungen von Entscheidungen auf Folgeentscheidungen. Je nach gewähltem Werkstoff werden die potentiellen Fertigungsverfahren eingeschränkt. Um den Energieaufwand zu berücksichtigen, werden potenzielle Streubereiche betrachtet. [PaMa13]

Steimer und Aurich untersuchen in [StAu16] die Abhängigkeiten und den Austausch von Informationen an der Schnittstelle zwischen der Produktentwicklung und der Produktionssystementwicklung. Das Ziel ist eine integrierte Entwicklung von Produktionssystemen auf Basis von Informationen aus den frühen Phasen der Produktentwicklung [SCAS16].

4.3 Auswahl von Produktlösungen

Die Suche und Auswahl optimaler Lösungen, um die Konstruktionsaufgabe bestmöglich zu erfüllen, ist eine zentrale Aufgabe bei der methodischen Entwicklung von Produkten. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel wesentliche Methoden zur Suche und Auswahl von Produktlösungen vorgestellt.

Gemäß der VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] erfolgt die Suche nach potentiellen Lösungsmöglichkeiten auf Basis der Funktionsstrukturen. Alle Teilfunktionen des Produktes müssen dabei von prinzipiellen Lösungen erfüllt werden, um die Anforderungen des Kunden erfüllen zu können. [VDI2221]

Wesentliche Teile der folgenden Abschnitte entsprechen [PBFG06]. Die aufgezählten Methoden stellen dabei eine repräsentative Auswahl an bekannten Methoden dar und haben nicht den Anspruch vollumfänglich zu sein. Die Vorgehensweise bei der Lösungsauswahl ist in Abbildung 38a zusammengefasst.

Um die Komplexität der Konstruktionsaufgabe zu reduzieren, wird die Hauptfunktion des Produktes in Teilfunktionen zerlegt. Für diese Teilfunktionen müssen Lösungen (Wirkprinzipien) gesucht werden, die im Anschluss zu einer Gesamtlösung integriert werden. [PBFG06]

Zur methodischen Unterstützung der Lösungsfindung, können verschiedene Werkzeuge eingesetzt werden. Konventionelle Methoden bei der Lösungssuche sind beispielsweise die Literaturrecherche, Analysen von Patenten, die Sichtung von Katalogen, die Analyse natürlicher Systeme,

die Analyse bereits existierender technischer Systeme oder der Einsatz von Messungen und Modellversuchen. Hinzu kommen intuitive Methoden wie Brainstorming oder Methode 635. [PBFG06]

Eine weitere international anerkannte Methode ist die Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ), die mit einer widerspruchsorientierten Problemlösung arbeitet. Die Verbesserung eines Parameters von einem technischen System bei gleichzeitiger Verschlechterung eines anderen resultiert in einem technischen Widerspruch. Diese Widersprüche werden mit innovativen Grundprinzipien (z.B. Prinzip der Abtrennung) adressiert. Die TRIZ-Methode liefert schließlich mögliche Grundprinzipien zur gewünschten Funktionserfüllung. [PBFG06]

Daneben existieren einige diskursiv betonte Methoden, die sich durch die schrittweise Vorgehensweise bei der Lösungsfindung auszeichnen. Auf Basis von physikalischen Effekten lassen sich durch Kombinationen mit groben Geometrien mögliche Wirkprinzipien ableiten. Ebenso können Lösungen für bestimmte Funktionen mittels Katalogen gefunden werden, in denen für verschiedene Teilfunktionen bekannte Lösungen hinterlegt sind. [PBFG06]

Im Anschluss erfolgt die Kombination von Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungen mithilfe von Kombinationsmethoden. Dazu zählt der in Abbildung 38b dargestellte morphologische Kasten nach [PBFG06] (ursprünglich entwickelt von Zwicky [Zwic89]). Für jede Teilfunktion (Zeile) wird zuerst eine Lösung ausgewählt. Diese Lösungen werden im Anschluss zu einer Gesamtkombination verknüpft. Problematisch ist jedoch die Entscheidung darüber, welche Lösungen verknüpft werden. Unverträglichkeiten werden hier erst einmal nicht berücksichtigt. Abhilfe schafft an dieser Stelle die Verträglichkeitsmatrix, bei der unzulässige Kombinationen erkannt und verworfen werden. [PBFG06]

Um die bestmögliche Produktlösung zu finden, setzt das methodische Vorgehen bei der Produktentwicklung ein größeres Lösungsfeld voraus. Diese Lösungen können bewertet und die beste Lösung ausgewählt werden [PBFG06].

Zu den Bewertungsmethoden zählen beispielsweise die Nutzwertanalyse nach [Zang14] und die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI2225 [VDI2225]. In Kapitel 4.6 werden entsprechende Bewertungsmethoden vorgestellt. Im Anschluss an die Bewertung kann die Auswahl der passenden Lösung erfolgen.

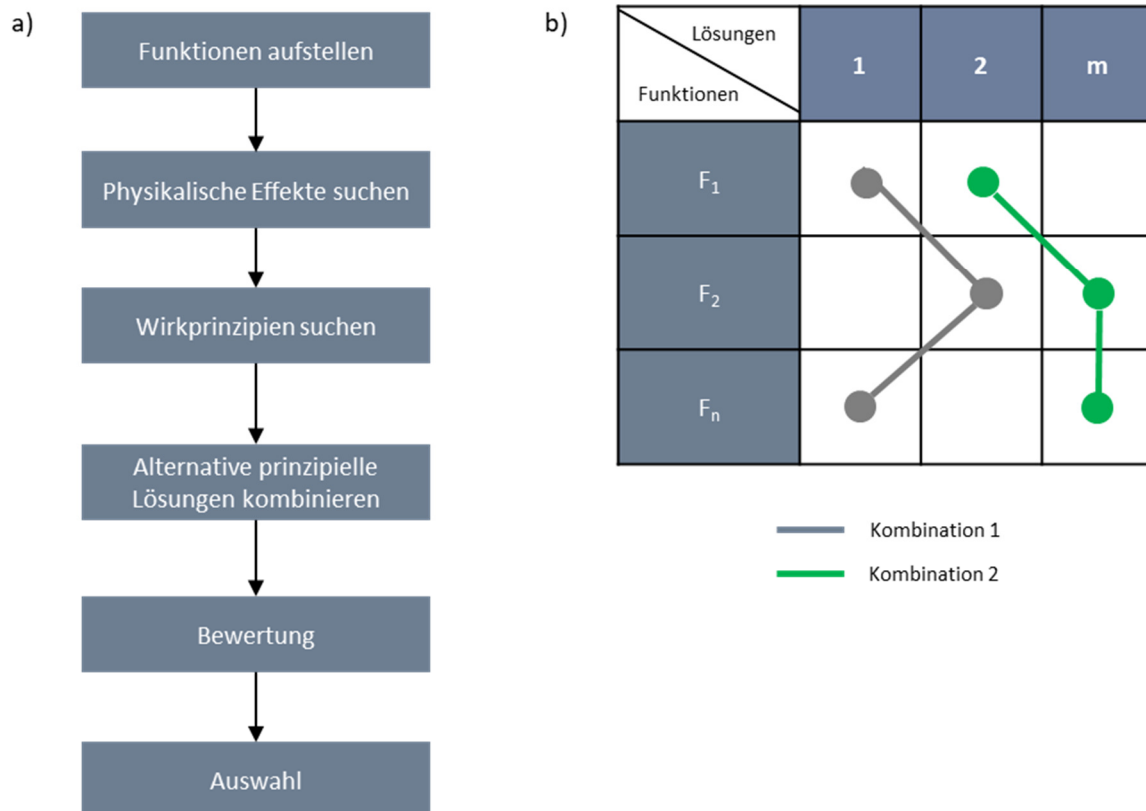


Abbildung 38: a) Vorgehensweise zur Lösungsauswahl (basierend auf [PFBG06]) b) Morphologischer Kasten (in Anlehnung an [PFBG06])

4.4 Materialauswahlmethoden

Die Auswahl der richtigen Materialien (Werkstoffe) stellt eine große Herausforderung für die Entwicklung von Produkten dar. Sie beeinflusst die technischen Eigenschaften, die Kosten und die Umweltauswirkungen in einem hohen Maße. Daher werden im Folgenden repräsentativ zwei etablierte und international anerkannte Ansätze (Materialauswahl nach Ashby und Materialauswahl Farag) für die Auswahl von Materialien vorgestellt.

Materialauswahl nach Ashby

Zur Unterstützung der Materialauswahl kann beispielsweise die international anerkannte Methode nach Ashby [Ashb05] angewandt werden. Abbildung 39 a) zeigt die vier zentralen Schritte um aus der Menge an möglichen Materialien, die für die gedachte Anwendung geeigneten Materialien auszuwählen. Zunächst werden die Anforderungen an die Konstruktion in Funktionen, Beschränkungen und frei wählbare Variablen übersetzt. Im Anschluss erfolgt der Ausschluss von Werkstoffen, die unter den gegebenen Beschränkungen nicht möglich sind. Die übrig gebliebe-

nen Werkstoffe gilt es nun anhand von Materialindizes nach ihrer Leistungsfähigkeit zu bewerten. Ein Beispiel für solch einen Materialindex ist beispielsweise die Steifigkeit in Abhängigkeit der Dichte. [Ashb05]

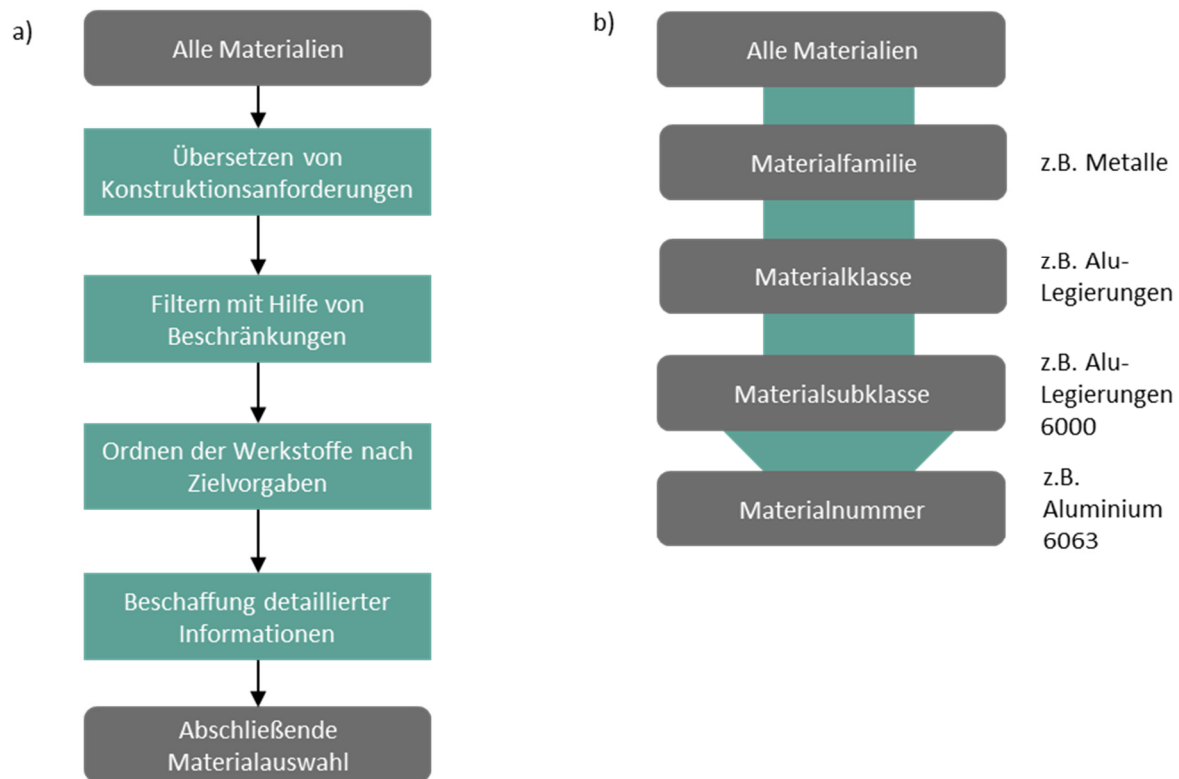


Abbildung 39: a) Vier Hauptschritte bei der Materialauswahl nach Ashby b) Eingrenzen der Materialien (in Anlehnung an [Ashb05])

Die finale Werkstoffauswahl erfolgt schließlich auf Basis detaillierter Informationen und Daten, wie bspw. Materialproben und entsprechenden Materialtests. Mit dieser Vorgehensweise kann also aus der Gesamtheit aller Materialien ein für den Anwendungsfall geeigneter Materialien gefunden werden (siehe Abbildung 39 b)). [Ashb05]

Um das eben beschriebene Auswahlverfahren effizient zu unterstützen, führt Ashby den Cambridge Engineering Selector (CES) [www4, Gran15] ein (siehe Abbildung 40). Mit diesem Software-Tool kann die Materialauswahl auf Basis umfangreicher Datenbanken durchgeführt werden. Die Software deckt auch Nachhaltigkeitsaspekte ab. [Gran15]

In [EsAs99] und [ABCS04] erweitern Ashby et al. die Materialauswahlmethode um eine Prozessauswahl. Die Prozessauswahl erfolgt analog zur Materialauswahl. In Abhängigkeit der Beschränkungen werden zunächst aus der Menge möglicher Prozesse die Prozesse herausgefiltert, die für die Anwendung und das Material brauchbar sind. Die anschließende Kostenbewertung der Prozesse ermöglicht das Ordnen der möglichen Lösungen nach wirtschaftlichen Kriterien. Im letzten

Schritt müssen detaillierte Informationen über die noch verbleibenden Prozesse eingeholt werden, um die abschließende Auswahl durchzuführen. [ABCS04]

In [ABCS04] wird auch eine mögliche Integration der Produktgeometrie und -dimensionierung in die Material- und Prozessauswahl angesprochen. Das Gestalten der Geometrie sollte eine optimale Material- und Prozessausnutzung berücksichtigen. Aus diesem Grund fordern Ashby et al. eine Kopplung von CAD-Werkzeugen, FEM-Werkzeugen und der CES-Software [www4, Gran15]. [ABCS04]

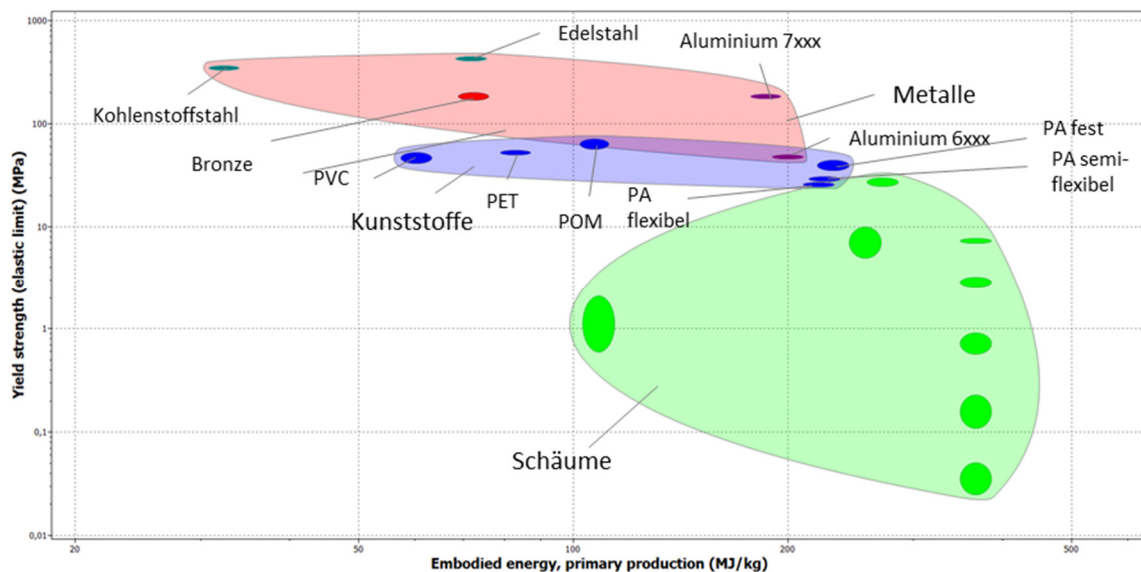


Abbildung 40: Screening-Bereich der CES-Software (basierend auf [Gran15])

Materialauswahl nach Farag

Der Ansatz nach Farag [Fara14] beschreibt eine weitere Methode zur Materialauswahl, die auch Prozess- und Gestaltaspekte integriert.

Farag arbeitet mit Leistungsindizes, die den Materialindizes von Ashby entsprechen. Bei der Materialauswahl gilt es das Material mit dem besten Leistungsindex, wie beispielsweise das Verhältnis zwischen Streckgrenze und Dichte, auszuwählen. Auf Basis dieser Beschreibung werden Hinweise für die Gestaltungsparameter für verschiedene Anwendungsfälle, wie z.B. Designing for Stiffness (Gestalten für steife Strukturen), hergeleitet. [Fara14]

Abbildung 41 zeigt die Vorgehensweise bei der Material- und Prozessauswahl nach Farag, die mit der Analyse der Materialanforderungen und der darauf basierenden Entwicklung von alternativen Material- und Prozesslösungen parallel zur Produktkonzeptentwicklung startet. Dazu erfolgt eine erste Vorauswahl. Im Anschluss werden diese alternativen Lösungsmöglichkeiten parallel

zur Konfigurationsentwicklung miteinander verglichen und gefiltert. Im letzten Schritt erfolgt schließlich die Ausgestaltung des Produktes unter der Berücksichtigung einiger vielversprechender Material- und Prozesskombinationen in der Detailentwicklung. Die möglichen Material- und Prozesskombinationen werden mit den verschiedenen Konstruktionsalternativen evaluiert und die optimale Produkt-Material-Prozess-Kombination ausgewählt. [Fara14]

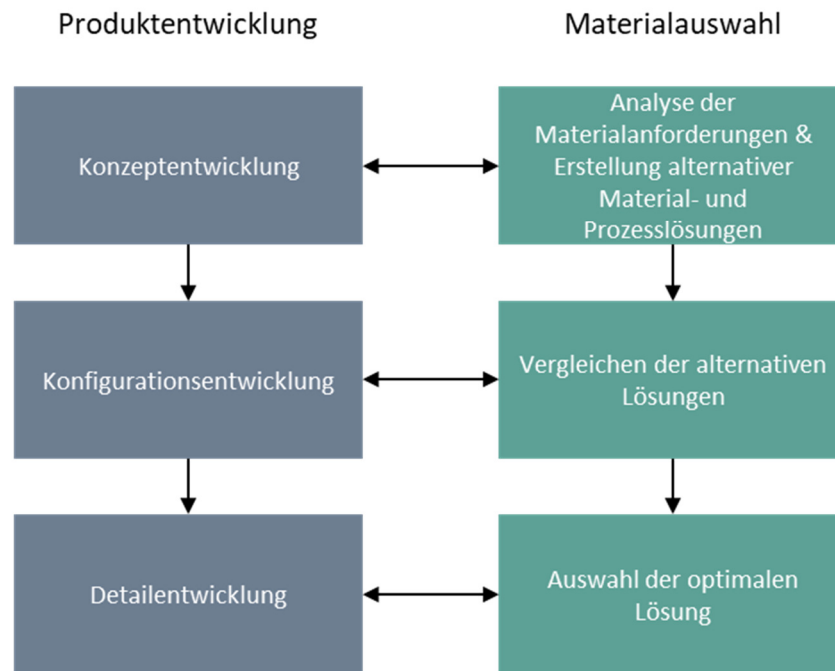


Abbildung 41: Materialauswahl nach Farag (in Anlehnung an [Fara14])

Die Bewertung und Auswahl fokussiert vor allem die Material- und Prozessauswahl. Auf die Bewertung der Konstruktionsergebnisse wird nicht näher eingegangen.

4.5 Auswahl von Fertigungstechnologien und -anlagen

Die Realisierung von physischen Produkten erfordert eine Verkettung mehrerer Herstellungsprozesse (Fertigungs- und Montageprozesse), ausgeführt auf entsprechenden Anlagen. Die Herausforderung besteht darin, aus der Vielzahl an verschiedenen Prozessen die für die jeweilige Anwendung geeigneten Prozesse auszuwählen. Dabei müssen Randbedingungen wie Kosten, Stückzahl, Raumangebot, Transportwege, ökologische Kriterien usw. berücksichtigt werden.

Die Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN8550] ermöglicht eine bessere Gliederung und Beschreibung der Prozesse. In den Hauptgruppen der Norm wird zwischen *Urformen*, *Umformen*, *Trennen*, *Fügen*, *Beschichten* und *Stoffeigenschaften ändern* unterschieden [DIN8550].

In dem folgenden Kapitel werden Methoden für die Auswahl von Fertigungstechnologien und -anlagen vorgestellt:

- Prozessauswahl nach Swift und Booker
- Generierung von alternativen Technologieketten nach Fallböhmer
- Generierung und Bewertung von alternativen Fertigungsfolgen nach Trommer
- Entwicklungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen nach Müller
- Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten nach Swat

Prozessauswahl nach Swift und Booker

Swift und Booker stellen in [SwBo03] einen Prozessauswahlprozess vor, der in Abbildung 42 dargestellt ist. Der Auswahlprozess beginnt mit dem Ableiten prozessrelevanter Informationen, wie Stückzahl, Material usw. Daraus können mithilfe von Technologieauswahlmatrizen geeignete Prozesse ausgewählt werden. Um die potenziellen Lösungen einzugrenzen, erfolgt eine Bewertung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Kriterien. [SwBo03]

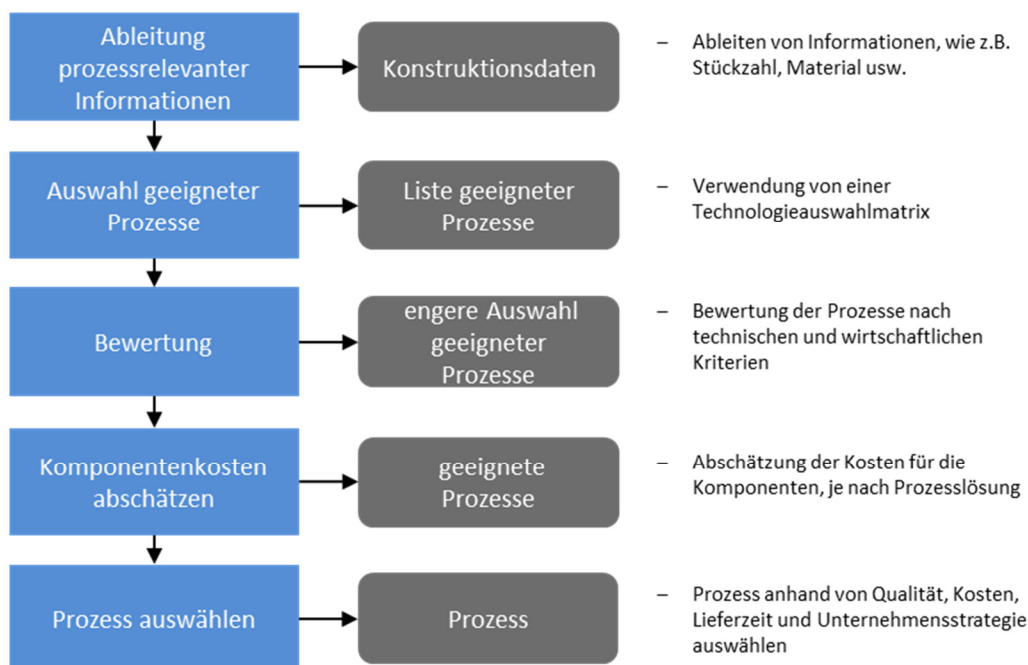


Abbildung 42: Prozessauswahl nach Swift und Booker (in Anlehnung an [SwBo03])

Für diese engere Auswahl werden im Anschluss die Kosten für die jeweilige Konstruktion abgeschätzt. Die finale Auswahl der Prozesse erfolgt schließlich anhand der Qualität, der Kosten, der Lieferzeit der Lösung und der Strategie des Unternehmens. [SwBo03]

Generierung von alternativen Technologieketten nach Fallböhrer

Nach Fallböhrer ist die Generierung von alternativen Technologieketten während der Konstruktionsphase sinnvoll, um die Potenziale neuer Fertigungstechnologien ausschöpfen zu können und die daraus entstehenden potenziellen Änderungen mit einfließen zu lassen [Fall00]. Das von ihm entwickelte Vorgehensmodell [Fall00] ist in Abbildung 43 dargestellt.

Im ersten Schritt wird eine Vorauswahl an Technologien festgelegt. Dazu werden die Hauptgruppen der DIN 8580 [DIN8580] nach potenziellen Technologien durchsucht. Die Herstellung von physischen Produkten beginnt dabei logischerweise immer mit den formgebenden Technologien (Kerntechnologie) und endet, wenn allen Merkmalen mindestens eine Technologie zugewiesen worden ist. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich der Technologien anhand ihrer Leistungsmerkmale, um den Lösungsraum einzugrenzen. [Fall00]

Von der Kerntechnologie hängen die nachfolgenden Prozesse ab. Im Anschluss folgen prinzipiell formverändernde Technologien, eigenschaftsverändernde Technologien und wieder formverändernde Technologien. Die Werkstoffeigenschaften haben einen essentiellen Einfluss auf die spätere Bauteilfunktion und können vor und nach der Formgebung verändert werden. Aus diesem Grund stehen die eigenschaftsverändernden Technologien im Vordergrund und die formverändernden können sowohl davor als auch danach kompatibel angeordnet werden [Fall00].

Der zweite Schritt befasst sich mit der technischen Machbarkeit der potenziellen Lösungen. Es werden alle Produkt- und Technologiemerkmale gegenübergestellt und auf die Realisierbarkeit hin überprüft. Falls die Machbarkeit eines Merkmals nicht direkt bestätigt werden kann, werden ergänzende Technologien gesucht, um mögliche Defizite auszugleichen. Ob sich eine Technologie dazu eignet, gibt der Überdeckungsgrad (zu welchem Grad ein Merkmal hergestellt werden kann) an, der je nach Wert entsprechende Maßnahmen zur Folge hat. [Fall00]

In der dritten Phase werden die Produktgeometrie, der Werkstoff und die Fertigungstechnologie weiter angepasst. Dazu diskutieren alle beteiligten Abteilungen die Ergebnisse der vorangegangenen Phase. [Fall00]

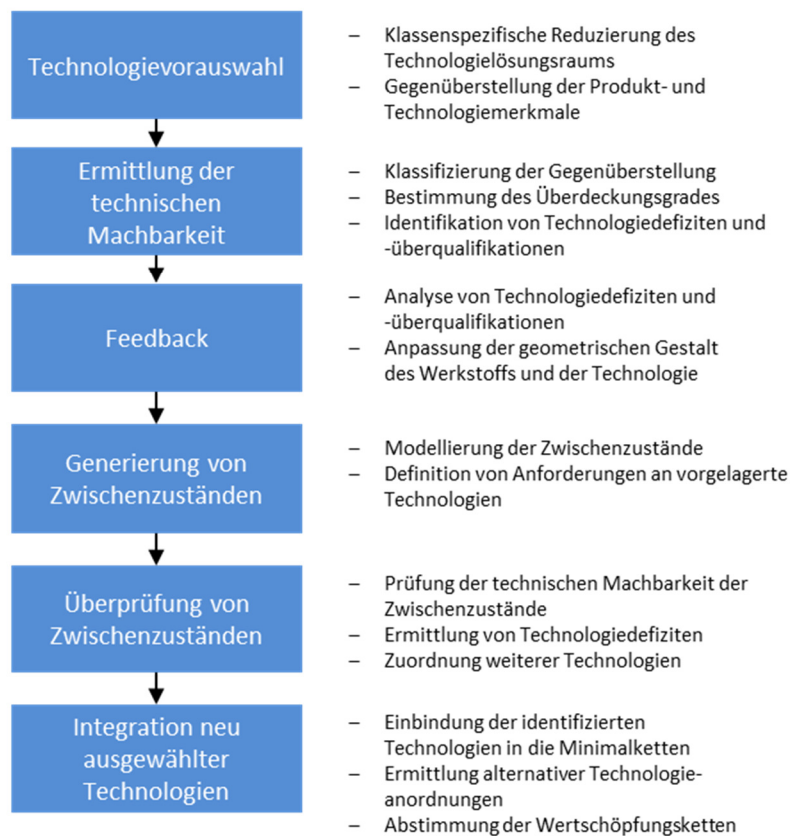


Abbildung 43: Generierung alternativer Prozessketten nach Fallböhrer (in Anlehnung an [Fall00])

Im Anschluss erfolgt die Entwicklung der Technologieketten. Auf Basis der Produkt-Technologie-Zuordnung sind bereits erste grobe Ketten entstanden, welche auf ihre Konsistenz hin überprüft und bei Bedarf ergänzt werden müssen. Fallböhrer arbeitet dabei mit der Modellierung von Bauteilzwischenzuständen, die den Schnittstellen der Fertigungstechnologien entsprechen. Stimmen die Bauteilzwischenzustände zwischen zwei Prozessen nicht überein, müssen Prozesse ergänzt werden. [Fall00]

Abschließend erfolgt wieder eine Gegenüberstellung der neu ermittelten Technologiemerkmale mit den Produktmerkmalen. Mögliche alternative Prozessketten entstehen, wenn mehrere Technologien die Lücken in der Kette füllen können. [Fall00]

Die generierten Technologien und Technologieketten werden im Anschluss bewertet und eingegrenzt. Fallböhrer bewertet in [Fall00] die technische Eignung. Die Auswahl und Gewichtung der Kriterien werden gemeinsam durch die Produkt- und Produktionsdefinition festgelegt. Über paarweise Vergleiche werden die zu überprüfenden Produktmerkmale bestimmt und die Eignung der Technologien zur Herstellung der Merkmale schließlich miteinander verglichen. Neben der

technischen Eignung werden die Kriterien Rationalisierungspotenzial, Qualitativer Nutzen, Realisierungsaufwand, Technologiepotenzial und Umweltverträglichkeit mithilfe von Technologieinformationsmodellen bewertet. [Fall00]

Fallböhmer beschreibt in [Fall00] eine methodische Vorgehensweise zur Generierung von Technologieketten auf Basis der Produktmerkmale. Die alternativen Lösungen bewertet er im Anschluss anhand ausgewählter technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Kriterien.

Generierung und Bewertung von alternativen Fertigungsfolgen nach Trommer

Trommer entwickelt in [Trom01] eine Vorgehensweise zur Generierung und Bewertung von alternativen Fertigungsfolgen. Fertigungsfolgen entstehen durch die Verknüpfung von Technologien mit Produktionsmitteln. Entsprechende Datenmodelle bilden die Grundlage des in Abbildung 44 dargestellten Ablaufs [Trom01].

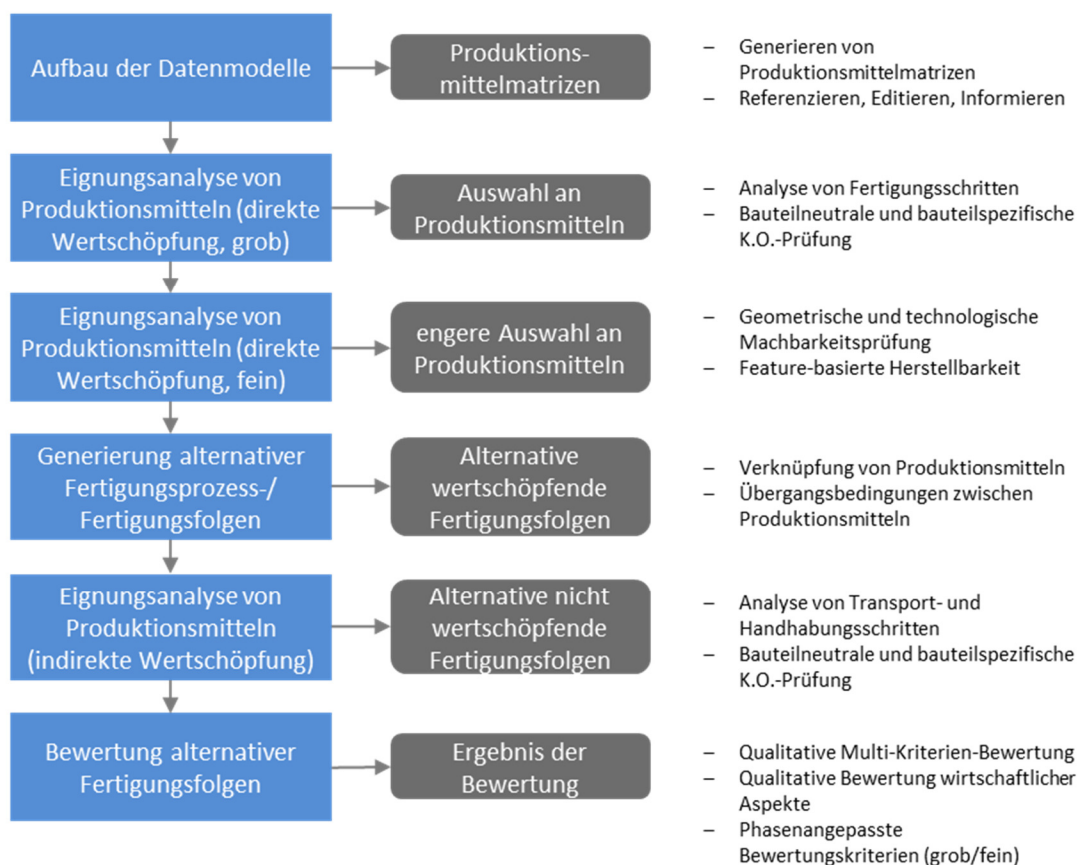


Abbildung 44: Vorgehensweise zur Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen nach Trommer (in Anlehnung an [Trom01])

Die Vorgehensweise beginnt mit dem Aufbau der benötigten Datenmodelle. Dabei werden alle potenziellen Kombinationen aus Gestaltvariante, Technologiekette und Produktionsumgebung in einer eigenen Produktionsmittelmatrix zusammengefasst. Es entstehen mehrere alternative Kombinationsmöglichkeiten. [Trom01]

Im Anschluss erfolgt eine Negativauswahl, um die Auswahl an Kombinationen einzugrenzen. Zunächst werden alle Produktionsmittel, die nicht die allgemeinen bauteilneutralen Anforderungen der Produktionsaufgabe erfüllen, verworfen. [Trom01]

Danach erfolgt eine Überprüfung, ob die Bauteileigenschaften von dem Produktionsmittel hergestellt werden können. Im nächsten Schritt werden die Produktionsmittel den einzelnen Stationen der Technologiekette zugeordnet. Bei der Zuordnung sind beispielsweise kurze Materialflusswege oder eine geringe Anzahl an Übergängen relevant. Für die nicht direkt an der Wertschöpfung beteiligten Zwischenschritte (Materialfluss) müssen ebenfalls die Schritte 2 bis 3 durchgeführt werden. In der Produktionsmittelmatrix wird zwischen jedem direkt wertschöpfenden Prozess ein Handhabungs- oder Transportprozess hinzugefügt. [Trom01]

Abschließend werden die alternativen Fertigungsfolgen qualitativ anhand mehrerer Kriterien (Zeit, Kosten) bewertet. Die Bewertung erfolgt mithilfe einer Erweiterung der Fuzzy-AHP-Methode nach Buckley [Buck84]. Eine Fuzzy-AHP ist ähnlich der Nutzwertanalyse, basiert aber nicht auf quantitativen Werten, sondern unscharfen Bereichen und kann in [ZiGu91] nachgelesen werden. [Trom01]

Trommer stellt in [Trom01] eine methodische Vorgehensweise zu Erstellung alternativer Fertigungsfolgen vor. Dabei ordnet er den verschiedenen Technologien der Technologiekette Produktionsmittel mithilfe von Produktionsmittelmatrizen zu. Die anschließende Bewertung nach technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien wird mit der Fuzzy-AHP-Methode durchgeführt.

Entwicklungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen nach Müller

Müller präsentiert in [Müll08] einen Ansatz zur entwicklungs- und planungsbegleitenden Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Die Integration zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung steht dabei im Vordergrund, um optimale Produkte und Verfahrensketten auszuwählen [Müll08].

Die Vorgehensweise (siehe Abbildung 45) beginnt mit der Aufstellung der Produktstrukturierung mittels Produktfunktionen und Produktelementen (ähnlich zu Wirkprinzipien), die die Produktfunktionen erfüllen sollen. Anhand dieser Elemente können mithilfe der Produkt-Primärverfahren-Matrix alternative Primärverfahrensketten erarbeitet werden. Die Produkt-Primärverfahren-Matrix erfasst die Relationen zwischen den primären Produktionsverfahren (die Verfahren, die einen maßgeblichen Anteil an der Wertschöpfung aufweisen) und den Produktmerkmalen. [Müll08]

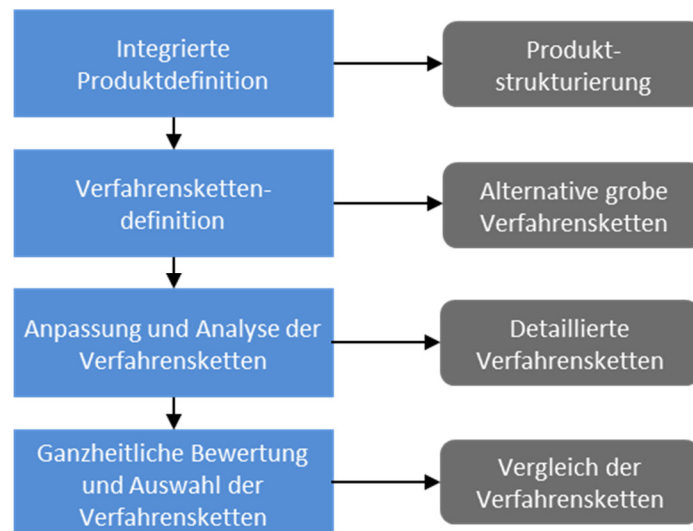


Abbildung 45: Generierung von Produktionsverfahrensketten nach Müller (in Anlehnung an [Müll08])

In der Matrix ist hinterlegt, ob und wie Produktelemente realisiert werden können, welche alternativen Verfahren zu Realisierung möglich sind und ob mehrere Produktelemente oder Verfahren gleichzeitig notwendig sind. Diese Primärverfahrensketten werden beispielsweise mit Ansätzen wie dem von Fallböhrer [Fall00] weiter detailliert. Neben dieser Matrix, dienen eine Wissenssammlung über die Produktionsverfahren und eine Matrix mit den Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Produktionsverfahren als weitere Hilfsmittel. Im Anschluss erfolgt die Auswahl der optimalen Verfahrenskette unter Zuhilfenahme eines Modells zur Kostenbewertung und eines Modells zur qualitativen Bewertung von Produktionsverfahren. [Müll08]

Müller generiert auf Basis der Produktelemente (ähnlich zu Wirkprinzipien) eine grobe Produktionsverfahrenskette. Er setzt dabei schon sehr früh in der Produktentwicklung an, um Produktionssystemlösungen abzuleiten. Die Bewertung der verschiedenen Ketten erfolgt dabei nur auf Basis von wirtschaftlichen und qualitativen Kriterien.

Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten nach Swat

Da in der heutigen Zeit eine einseitige Ausrichtung nach Planungsgrößen wie Zeit, Qualität und Kosten unter Vernachlässigung der Umweltauswirkungen nicht mehr ausreichend ist, adressiert Swat in [Swat15] die Energieeffizienz bei der Planung und Gestaltung von Fertigungsprozessketten. Die Fertigungsprozessketten weisen im Gegensatz zu den Technologieketten einen konkreten Bezug zu den Fertigungsmitteln auf [Trom01].

Der Ausgangspunkt der Vorgehensweise ist die Analyse des Energiebedarfs von Fertigungsprozessen. Die dort ermittelten Kennwerte werden anschließend in eine dreidimensionale Energieplanungsdatenbank eingepflegt. Die Datenbank beinhaltet die Energieplanungswerte für mögliche Kombinationen von Betriebsmittel, Prozessparameter und Bearbeitungsaufgabe. Mithilfe dieser Planungsdatenbank kann schließlich der Energiebedarf für ein konkretes Szenario abgeleitet werden. Die Summe aller Prozesse resultiert im werkstückbezogenen Energiebedarf, der im Anschluss für die Auswahl der optimalen Fertigungsprozesskette verwendet werden kann. [Swat15]

4.6 Bewertungsmethoden

Eine sinnvolle Einschränkung der Lösungsmenge, ebenso wie die Auswahl von Lösungen setzt eine Bewertung anhand objektiver Kriterien voraus.

In dieser Arbeit werden im Rahmen der Ressourceneffizienz die ökologischen Kriterien, die den Ressourceneinsatz adressieren sowie die technischen und wirtschaftlichen Kriterien betrachtet (siehe Kapitel 1).

Im Folgenden wird daher ein Auszug aus technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und kombinierten Bewertungsverfahren präsentiert, die sich an der späteren Verwendung innerhalb des in dieser Arbeit entwickelten Gesamtkonzepts orientieren. Dabei existiert für die nicht kombinierten Verfahren eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden, von denen einige etablierte Methoden hier beispielhaft aufgezeigt werden.

Die Bewertungsmethoden sind im Folgenden nach den Kriterien und nicht nach Produkt, Produktionssystem und Material geordnet, da es oft keine klare Trennung dazwischen gibt.

4.6.1 Technische Bewertung

Für die eindimensionale Bewertung von Lösungen nach technischen Gesichtspunkten gibt es einfache Bewertungsmethoden, wie beispielsweise den paarweisen Vergleich, die Auswahlliste und die einfache Punktebewertung.

Für komplexere Betrachtungen sind die nachfolgenden Methoden anwendbar:

- Gewichtete Punktbewertung
- Nutzwertanalyse
- Werkzeuge der Digitalen Fabrik

Dabei ist zu beachten, dass neben den technischen Kriterien auch andere Kriterien (z.B. wirtschaftliche Kriterien) in die Bewertung miteinfließen können.

Gewichtete Punktbewertung

Die gewichtete Punktbewertung beginnt mit der Festlegung der Bewertungskriterien und der Gewichtung dieser. Im Anschluss werden den verschiedenen Lösungen technische und wirtschaftliche Daten zu den jeweiligen Kriterien zugeordnet. Anhand einer Bewertungsskala von 0 bis 10 erfolgt in Kombination mit den Gewichtungsfaktoren eine Bewertung der Daten. Aus der Summe der Werte kann schließlich eine Rangfolge abgeleitet werden. [Ehrl09]

Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse nach [Zang14] ist vor allem für komplexe Projekte gedacht. Sie beginnt mit einer hierarchischen Gliederung der Bewertungskriterien mittels eines Zielsystems, bestehend aus Oberzielen, Zwischenzielen und Teilzielen. Anschließend erfolgt die Gewichtung der Ziele. Hierbei werden die Gewichtungsfaktoren an jedem Verzweigungspunkt wieder auf die einzelnen untergeordneten Ziele aufgeteilt. Im darauffolgenden Schritt erfolgt die Zuordnung der technischen und wirtschaftlichen Daten der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten zu den Zielen. [Ehrl09]

In der anschließenden Zielwertmatrix werden den technischen und wirtschaftlichen Werten mittels eines Bewertungsschemas Zielwerte (von 0 bis 10) zugeordnet. Im letzten Schritt werden diese Zielwerte mit den Gewichtungsfaktoren zu einer Nutzwertmatrix multipliziert. Die Summe aller an einer Lösung beteiligten Nutzwerte resultiert im Gesamtnutzwert. [Ehrl09]

Zur Gewichtung der einzelnen Ziele/Kriterien kann ein paarweiser Vergleich durchgeführt werden. Daraus ergibt sich eine Rangfolge mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren. [Ehrl09]

Werkzeuge der Digitalen Fabrik

Die Digitale Fabrik stellt digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge zur Planung und Evaluierung der Prozesse und Ressourcen in Verbindung mit dem Produkt bereit. Dadurch entsteht die Möglichkeit, Produktionssysteme und -prozesse frühzeitig abzusichern und die Funktionsweise vorab zu simulieren. [VDI4499]

Mithilfe der Werkzeuge der Digitalen Fabrik lässt sich im Rahmen dieser Arbeit das technische Zusammenspiel zwischen Produkt und Produktionssystem evaluieren. Dazu werden beispielsweise 3D-Kinematiksimulationen, Ablaufsimulationen, Computer-Aided-Manufacturing (CAM) und die Virtuelle Inbetriebnahme eingesetzt [BrWG09]. Diese Hilfsmittel ermöglichen beispielsweise die technische Überprüfung, ob Merkmale (z.B. Nuten) hergestellt oder Teile gefügt werden können.

4.6.2 Wirtschaftliche Bewertung

Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Bewertungsmethoden für die eindimensionale Bewertung von Lösungen nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die hier vorgestellten Methoden sollen nur Möglichkeiten darstellen und eignen sich für die später vorgestellte Bewertung aufgrund einer effizienten Anwendung:

- Kostenermittlung über Datenbanken
- Investitionsrechnung
- Lebenszykluskostenrechnung

Kostenermittlung über Datenbanken

Für eine frühe Bewertung des Produktionssystemkonzepts ist eine grobe Kalkulation der Kosten verschiedener Herstellungstechnologien erforderlich. Eine überschlägige Bewertung der Kosten für verschiedene Herstellungstechnologien kann auf Basis der CES-Software von Granta Design [www4, Gran15] erfolgen.

In der zugrundeliegenden Datenbank sind die Kosten für die Bearbeitung einer Einheit hinterlegt (Werte basieren teilweise auf Schätzungen). Diese setzen sich aus Materialkosten, Fixkosten, Gemeinkosten, Energiekosten sowie Forschungs- und Lizenzkosten zusammen. [Gran15]

Die Kosten zur Beschaffung von Materialien sind ebenfalls in der CES-Software hinterlegt. Die Werte stammen beispielsweise aus Online-Datenbanken, wie [www5] oder [www6]. Durch die hohe Dynamik der Rohstoffpreise ist eine kontinuierliche Anpassung notwendig. [Gran15]

Rohstoffdatenbanken, wie beispielsweise die von worldbank.org [www7] können ebenfalls eingesetzt werden.

Investitionsrechnung

Die Verfahren der Investitionsrechnung bieten auf Basis wirtschaftlicher Daten eine methodische Unterstützung des Entscheidungsprozesses bei Investitionsobjekten. Zu solchen Investitionsrechnungsverfahren gehören in Abhängigkeit der Datensicherheit und Zielkriterien (qualitativ oder quantitativ) beispielsweise die Kapitalwertmethode, Nutzwertanalyse und Amortisationsrechnung. [Pogg11]

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Verfahren der Investitionsrechnung allgemein zur wirtschaftlichen Bewertung potenzieller Produktionsanlagen eingesetzt. Auf eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet, da sie lediglich eine Möglichkeit der Bewertung darstellt. Die Lebenszykluskostenrechnung wäre eine weitere Möglichkeit für eine solche wirtschaftliche Bewertung von alternativen Investitionsobjekten.

Lebenszykluskostenrechnung

Mithilfe der Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing) können ebenfalls die Kosten für verschiedene Investitionsobjekte abgeschätzt werden, um den Entscheidungsprozess zu unterstützen [Norr01].

Dabei werden alle Kosten, die während der Entstehung, Nutzung und Entsorgung eines Investitionsobjektes anfallen, kumuliert [Zehb96, EKLM14]. Zu diesen Kosten zählen Estandskosten, einmalige Kosten, Betriebskosten, Instandhaltungskosten und sonstige Kosten [EKLM14].

Nach Ehrlenspiel [EKLM14] et al. überdeckt sich der Begriff *Lebenszykluskosten* zum Teil mit anderen Kostenbegriffen. In frühen Phasen bietet sich aufgrund der unsichereren Informationslage eine Kurzkalkulation oder Kostenschätzung an [EKLM14]. In [EKLM14] können die Kostenmethoden detailliert nachgelesen werden.

Die Lebenszykluskostenrechnung wird in dieser Arbeit zusätzlich zu Dokumentationszwecken verwendet, da bei Kenntnis der genauen wirtschaftlichen Daten eine abschließende exakte Gesamtevaluation der Kosten, die während des Lebenszyklus anfallen, durchgeführt werden kann. Laut Trossmann ist die Lebenszykluskostenrechnung ein spezieller Anwendungsfall einer Investitionsrechnung [Tros98].

Die Berechnung der Materialkosten nach VDI 2225 [VDI2225] werden ausgehend von dem geschätzten Werkstoffvolumen durch Multiplikation mit dem Preis eines Bezugsmaterials und der Relativkostenzahl (Quotient aus Kosten des Vergleichsmaterials und des Bezugsmaterials) berechnet. Zusätzlich wird ein Werkstoffgemeinkosten-Zuschlagfaktor dazugerechnet. Die Relativkostenzahl kann anhand von Tabellen ermittelt werden. [VDI2225]

Weitere Kostenmethoden können [EKLM14] entnommen werden.

4.6.3 Ökologische Bewertung

Die Reduzierung des Ressourceneinsatzes während des Produktlebenszyklus erfordert bereits in der Entwicklung eine entsprechende Bewertung von Lösungen anhand ökologischer Kriterien. Die in der Arbeit verwendeten Bewertungsmethoden, die die ökologische Dimension abdecken, bilanzieren entweder den Ressourcenverbrauch (im Sinne einer Sachbilanz) oder die dadurch resultierenden Auswirkungen (z.B. wie bei der Ökobilanz).

Eine umfassende Ermittlung von Umweltauswirkungen, wie sie bei einer vollumfänglichen Ökobilanz durchgeführt wird, liefert bei der Bewertung die genauesten Ergebnisse. Die Ökobilanz benötigt hierbei verschiedenste Methoden zur Datenermittlung und ist eher als übergeordnete Methode anzusehen.

Oftmals werden jedoch Bewertungen bedingt durch den sehr hohen Arbeitsaufwand auf die weit verbreiteten Wirkungskategorien Treibhauspotential und Energieressourcenverbrauch beschränkt.

In diesem Kapitel werden die folgenden Bewertungsmethoden vorgestellt:

- Ökobilanz
- CO₂-Bilanz
- Kumulierter Energieaufwand
- Energieplanungsdatenbank
- Ressourcenkritikalität
- Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)

Ökobilanz

Eine Ökobilanz (engl. Lifecycle Assessment) beschreibt die Umweltaspekte und Umweltauswirkungen während des Lebenszyklus eines Produktes, beginnend mit der Materialgewinnung über die Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung [ISO14040]. Bei der Durchführung einer Ökobilanz-Studie müssen die Grundsätze nach [ISO14040] eingehalten werden.

Der Prozess zur Durchführung einer Ökobilanz-Studie beginnt mit der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Während der anschließenden Sachbilanz-Phase erfolgt die Ermittlung aller Ein- und Ausgangsdaten des zu untersuchenden Systems. Auf Basis dieser Daten kann im Anschluss die Wirkungsabschätzung durchgeführt werden. Hierbei werden den Daten der Sachbilanz Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren (quantifizierbarer Wert einer Wirkungskategorie) zugeordnet. Das Treibhausgaspotenzial sowie die Human-Toxizität sind Beispiele für solche schadensorientierten Wirkungskategorien. Die erarbeiteten Ergebnisse bilden schließlich die Grundlage für potenzielle Entscheidungen. [ISO14040]

Aufgrund des Umfangs der bei der Auswertung an zu beachtenden Wirkungskategorien bietet sich eine gewichtete Zusammenfassung von mehreren Wirkungskategorien z.B. zum Eco-indicator 99 (Einheit: mPt) [GoSp01]. Damit werden die Umweltauswirkungen zu einem Wert zusammengefasst, was aber eben auch den Nachteil hat, dass eine Gewichtung von unterschiedlichen Auswirkungen, die schwer miteinander zu vergleichen sind, vorgenommen wurde.

Eine solche Ökobilanz-Studie ist ebenfalls auf Produktionsanlagen anwendbar. Die Ergebnisse müssen in einer vollumfänglichen Ökobilanz eines Produktes in der Herstellungsphase des Produktes anteilig berücksichtigt werden.

Um eine Ökobilanz schneller durchführen zu können, bietet sich gerade auch bei unsicherer Datenlage eine Kurzbilanzierung an, bei der Werte von Vergleichsprodukten, Vergleichsprozessen oder ähnlichen Objekten verwendet werden oder Standardwerte zum Einsatz kommen.

Software-Tools wie GaBi [www8] oder SimaPro [www9] unterstützen die operative Verwendung der Ökobilanz-Bewertungsmethode zur Bestimmung der Umweltauswirkungen im Verlauf von Entwicklungsprojekten. Die Berechnungsergebnisse hängen dabei sehr stark von der dahinterliegenden Datenbank ab.

CO₂-Bilanz

Die CO₂-Bilanz bilanziert die Menge an Treibhausgasemissionen (mittels CO₂-Äquivalenten), die z.B. durch ein bestimmtes Produkt emittiert wird [HoJS13]. Eine Bewertung der CO₂-Bilanz für die

Bereitstellung von Materialien ebenso für verschiedene Fertigungstechnologien ist mit der CES-Software [Gran15] möglich. Die Werte stammen aus der entsprechenden Fachliteratur, wie beispielsweise [VoON03], sind aber auch teilweise geschätzt. In der zugrundeliegenden Datenbank sind die CO₂-Äquivalente für verschiedene Fertigungstechnologien in Kombination mit dem bearbeiteten Material hinterlegt [Gran15].

Kumulierter Energieaufwand

Die Summe an Primärenergie, die während des Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung aufgewendet werden muss, wird als kumulierter Energieaufwand KEA bezeichnet. Dieser setzt sich aus dem kumulierten Prozessaufwand KPA und dem kumulierten nichtenergetischen Aufwand KNA zusammen. [VDI4600]

Der kumulierte Prozessaufwand KPA fasst alle primärenergetischen Aufwendungen, die während eines Prozess verbraucht werden (z.B. Licht, Wärme, Kraft) zusammen. Der kumulierte nichtenergetische Aufwand KNA subsummiert hingegen die Primärenergieinhalte der nichtenergetisch eingesetzten Energieträger (z.B. Schmieröl) (Nichtenergetischer Verbrauch NEV) und die Primärenergieinhalte aller brennbaren Stoffe (Stoffgebundener Energieinhalt SEI), die nicht als Energieträger ausgewiesen sind. [VDI4600]

Diese Berechnungsgrundlage kann auf alle Phasen des Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung, Entsorgung) angewendet werden. Eine operative Nutzung setzt eine geeignete Datenbank voraus, die für die Bereitstellung von Materialien sowie für verschiedene Fertigungstechnologien usw. Werte für den kumulierten Energieverbrauch bereitstellt. Die CES-Software [Gran15] enthält eine solche Datenbank, die wiederum auf der ecoinvent-Datenbank [www10] basiert. Teilweise werden die Werte auch abgeschätzt [Gran15]. Das Softwaretool stellt den Primärenergiebedarf der Fertigungstechnologien in Abhängigkeit der Materialien bereit [Gran15].

Energieplanungsdatenbank

Die Energieplanungsdatenbank nach Swat [Swat15] ermöglicht die Beurteilung alternativer Fertigungsprozessketten (Kombinationen von Betriebsmitteln) hinsichtlich ihres Energiebedarfs. In dieser Energieplanungsdatenbank sind Werte für den Energiebedarf verschiedener Fertigungsprozesse hinterlegt, die mit einer entsprechenden Analysemethode (nachzulesen in [Swat15]) ermittelt wurden. Die Datensätze sind in Abhängigkeit von Betriebsmittel, Prozessparameter und Bearbeitungsaufgabe angeordnet. Mithilfe einer solchen Datenbank ist somit eine Abschätzung

des Energiebedarfs für alternative Produktionsanlagen bzw. Fertigungsprozessketten möglich. [Swat15]

Ressourcenkritikalität

Die Kritikalität von Ressourcen beschreibt das Risiko bei der Versorgung mit Ressourcen. Über eine Analyse der Ressourcenkritikalität lässt sich feststellen, welche Materialien als besonders versorgungskritisch anzusehen sind. [VDI4800, AsCF16]

Nach der VDI-Richtlinie 4800 [VDI4800] wird zwischen exogenen und endogenen Kriterien unterschieden. Die exogenen Kriterien beschreiben das Risiko bei der angebotsseitigen Rohstoffversorgung (Versorgungsrisiko), während die endogenen Kriterien die Auswirkungen von Versorgungsstörungen auf das Unternehmen bewerten (Vulnerabilität). [VDI4800]

Das Versorgungsrisiko wird durch geologische, technische, strukturelle, geopolitische, regulatorische und wirtschaftliche Kriterien bestimmt. Dazu zählen beispielsweise die statische Reichweite von Ressourcen (Verhältnis von Reserven zu globaler Jahresproduktion), geopolitische Risiken der Weltproduktion und die Rohstoffpreisschwankungen. [VDI4800]

Die Kritikalitätsanalyse nach der VDI-Richtlinie 4800 [VDI4800] ermittelt zunächst Indikatorwerte für die betrachteten Kriterien, die daraufhin anhand eines Bewertungsschema (0, 0.3, 0.7, 1) normiert werden. Die Berechnung der einzelnen Indikator-Werte kann in [VDI4800] nachgelesen werden.

Eine effiziente Möglichkeit zur Analyse der Kritikalität von Ressourcen kann anhand von entsprechenden Datenbanken, wie sie die CES-Software [Gran15] verwendet, erfolgen. Das Programm stellt Indikatorwerte für fünf verschiedene Kriterien zur Verfügung (siehe Tabelle 5).

Die Kriterien zielen zwar auf Nachhaltigkeitsaspekte ab, könnten jedoch ebenso den wirtschaftlichen Kriterien zugeordnet werden, da dadurch die Kosten beeinflusst werden. Sie wurden hier vor allem wegen dem Risiko durch begrenzte Vorkommen den ökologischen Kriterien zugeordnet.

Kriterium	Kurzbeschreibung	Wertebereich		Datenquelle
Risiko durch begrenztes Vorkommen	Versorgungsrisiko bei seltenen Ressourcen	Vorkommen in der Erdkruste (ppm)	Risikolevel	z.B. [USGS 16]
		> 10000 100 - 10000 1 - 100 0.01 - 1 < 0.01	Sehr niedrig Niedrig Mittel Hoch Sehr hoch	
Beschaffungsrisiko und geopolitisches Risiko	Versorgungsrisiko durch politische Instabilität oder Bürgerunruhen	Herfindahl-Hirschmann-Index für Beschaffung und geopol. Risiko	Risikolevel	z.B. [EuCo14]
		< 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 >4	Sehr niedrig Niedrig Mittel Hoch Sehr hoch	
Risiko ökologischer Restriktionen	Versorgungsrisiko durch ökologische Restriktionen bzw. Gesetze	Herfindahl-Hirschmann-Index für ökolog. Restriktionen	Risikolevel	z.B. [EuCo14] und [Hsu16]
		< 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4 >4	Sehr niedrig Niedrig Mittel Hoch Sehr hoch	
Preisschwankungsrisiko	Versorgungsrisiko durch Preisschwankungen	Preisschwankungen (%)	Risikolevel	z.B. [EuCo14] und [CACT13]
		<100 100 - 200 200 - 300 300 - 400 >400	Sehr niedrig Niedrig Mittel Hoch Sehr Hoch	
Konfliktmaterialrisiko	Konfliktmaterialrisiko durch die Finanzierung der Ressourcenbeschaffung		Risikolevel	z.B. [USCH10]
		keine Angaben Material aus Krisengebiet Konfliktmaterial	kein Warnung Hoch	

Tabelle 5: Kriterien für die Ressourcenkritikalität nach Ashby (basierend auf [Gran15])

Material-Input pro Serviceeinheit (MIPS)

Schmidt-Bleek postuliert in [Schm97], dass vor allem der Material-, Energie- und Flächenverbrauch einen großen Anteil an den vom Menschen verursachten Umweltauswirkungen hat. Aus

diesem Grund führt der Autor einen neuen Kennwert für die Umweltbelastungsintensität ein. Der MIPS steht für Material-Intensität pro Serviceeinheit und ist die Summe aller Materialbewegungen, die während des Lebenszyklus für die Bereitstellung einer Funktion oder einer Dienstleistung verursacht werden. [Schm97]

In Tabellen wie beispielsweise [Wupp14] sind für verschiedene Materialien, Treibstoffe und Nahrungsmittel Materialintensitätswerte hinterlegt. Die Werte setzen sich dort aus den abiotischen und biotischen Materialaufwänden, der benötigten Luft und dem verbrauchten Wasser sowie der Bodenbewegung in Land- und Forstwirtschaft zusammen. Die Material-Intensität beschreibt also den Aufwand an den zuvor aufgeführten Ressourcen. [Wupp14]

Für den Flächenverbrauch führt Schmidt-Bleek den FIPS-Kennwert (Flächenintensität pro Serviceeinheit) ein, auf den hier jedoch nicht weiter eingegangen wird und der bei Bedarf in [Schm97] nachgelesen werden kann.

Die Ermittlung des Rohstoffverbrauchs, den der MIPS-Kennwert schließlich repräsentiert, kann auch nach der VDI-Richtlinie 4800 [VDI4800] erfolgen. Die benötigten Werte zur Berechnung können Datenbanken wie der ecoinvent-Datenbank [www10] entnommen werden.

4.6.4 Kombinierte Bewertung

Die in Kapitel 4.6.1 bis 4.6.3 vorgestellten Bewertungsverfahren weisen eine eindimensionale Struktur auf. Eine ganzheitliche, mehrdimensionale Bewertung beinhalten diese Verfahren nicht. Dadurch wird ein erhebliches Potenzial verschenkt. Es gibt nur wenige Ansätze, die eine mehrdimensionale Bewertung adressieren. Diese werden im Folgenden vorgestellt:

- Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225
- Technisch-ökonomisch-ökologische Bewertung nach Müller-Langer
- Mehrdimensionale Bewertung alternativer Kombinationen aus Werkstoff, Fertigungsverfahren und Geometrie nach Benders

Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225

Die Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 [VDI2225] ermöglicht eine technisch und wirtschaftlich kombinierte Bewertung von Produktlösungen. Die Werte für beide Kriterien werden in einem Stärke-Diagramm (siehe Abbildung 46a) visualisiert, das die Gegenüberstellung der Bewertung sehr gut veranschaulicht. Die ideale Lösung würde eine technische

und wirtschaftliche Wertigkeit von je 1,0 aufweisen. An diesen Punkt versucht man sich während der Entwicklung anzunähern (s_1 bis s_3). [VDI2225]

Die technische Wertigkeit einer Lösung wird mittels eines Bewertungsschemas (siehe Abbildung 46b) bestimmt, da viele technische Eigenschaften nicht durch eine Zahl repräsentiert werden können. Der Wertebereich erstreckt sich bei dieser Bewertungsmethode von 4 Punkten für „sehr gut“ bis 0 Punkte für „unbefriedigend“. Durch die Normierung der Werte ist eine bessere Vergleichbarkeit gewährleistet. Die Normierung erlaubt außerdem auch eine Gewichtung der bewerteten Eigenschaften. [VDI2225]

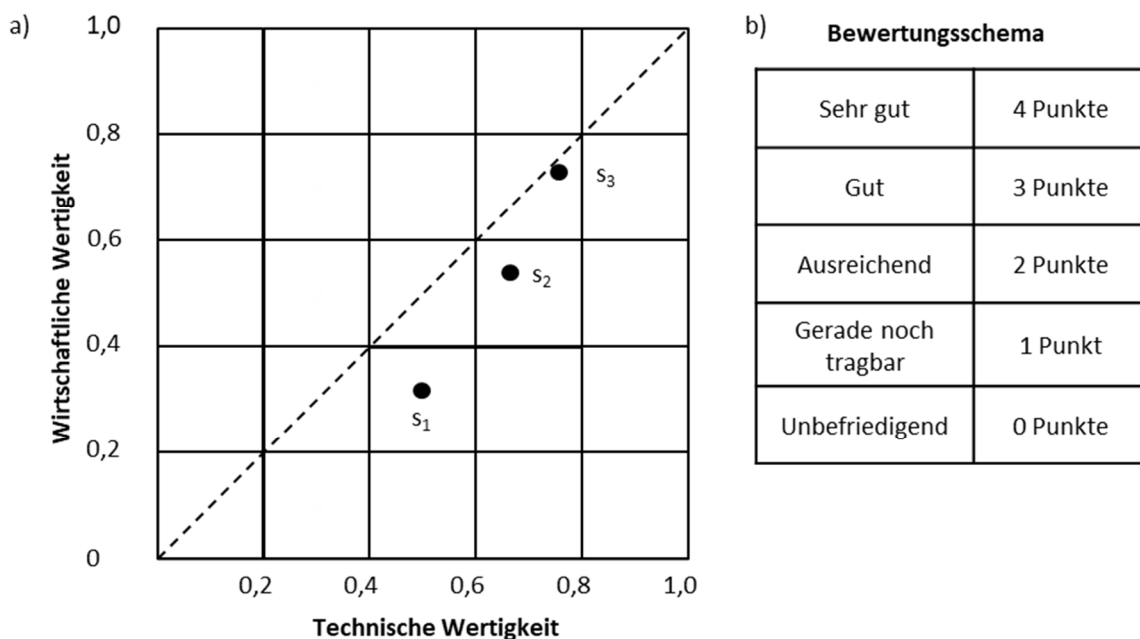


Abbildung 46: a) Stärkediagramm b) Bewertungsschema (in Anlehnung an [VDI2225])

Die wirtschaftliche Wertigkeit basiert im Wesentlichen auf den Herstellkosten. Zu einer Ideallösung werden die Kosten der jeweiligen Lösung ins Verhältnis gesetzt. Dadurch erhält man die wirtschaftliche Wertigkeit einer Lösung. Die Kosten der Ideallösung werden normalerweise mit 70% der zulässigen Kosten angesetzt. [VDI2225]

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung stellt die technischen und wirtschaftlichen Kriterien sehr anschaulich gegenüber, lässt jedoch ökologische Kriterien außen vor.

Technisch-ökonomisch-ökologische Bewertung nach Müller-Langer

Müller-Langer stellt in [MüLa11] einen methodischen Ansatz zur technisch-ökonomisch-ökologischen Bewertung verschiedener Biokraftstoffkonzepte vor. Sie führt für alle Konzepte eine technische, ökonomische und ökologische Bewertung durch und stellt die Ergebnisse technisch-

ökonomisch, technisch-ökologisch, ökonomisch-ökologisch und technisch-ökonomisch-ökologisch gegenüber. [MüLa11]

In der technischen Bewertung setzt Müller-Langer das Rangfolgeverfahren und die Nutzwertanalyse ein. In der wirtschaftlichen Bewertung kumuliert sie alle Kosten, die für die Bereitstellung (bis zur Antriebswelle im Fahrzeug) entstehen und setzt eine dynamische Investitionsrechnung ein. Umweltauswirkungen werden auf Basis der Grundlagen einer Ökobilanz nach ISO14040 [ISO14040] ermittelt. Aufgrund von einer unzureichenden Datenbasis erfolgt nur die Ermittlung des spezifischen Verbrauchs an fossilen Energieträgern, des anthropogenen Treibhauseffektes sowie des Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial. [MüLa11]

Die Bewertung nach Müller-Langer stellt einen sehr interessanten Ansatz dar, da die drei Bewertungskriterien (technisch, wirtschaftlich und ökologisch) gegenübergestellt werden. Die zweidimensionale Darstellung verringert das Potenzial allerdings. Außerdem ist der Ansatz auf die Bewertung und Auswahl verschiedener Treibstoffkonzepte ausgerichtet und nicht auf technische Produkte.

Mehrdimensionale Bewertung alternativer Kombinationen aus Werkstoff, Fertigungsverfahren und Geometrie nach Benders

Benders entwickelt in [Bend11] (bereits in Kapitel 4.2 beschrieben) alternative Kombinationen aus Geometrie, Fertigungsverfahrensketten und Werkstoffen. Für die anschließende Auswahl schlägt er eine Bewertung anhand einer Auswahlliste, Nutzwertanalyse oder der technisch-wirtschaftlichen Bewertung vor. Die Bewertung der Kombinationen erfolgt anhand von technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bewertungskriterien. [Bend11]

Detaillierte Informationen zu den drei Bewertungskriterien und den Informationsquellen liefert Benders allerdings nicht und beleuchtet den Aspekt der Bewertung nur sehr oberflächlich.

Ökologisch-technisch-wirtschaftlich kombinierte Bewertungen werden bisher nicht ausreichend diskutiert, obwohl sie das größte Potenzial bei der Bewertung von alternativen Lösungen bieten.

5 Defizite und Handlungsbedarf

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse der vorgestellten Ansätze aus dem Stand der Technik, um mögliche Schwachstellen und Einschränkungen bestehender Ansätze und die Relevanz eines erweiterten Ansatzes hervorzuheben.

Tabelle 6 stellt die Ergebnisse der Analyse der wesentlichen Ansätze aus dem Bereich Simultaneous Engineering/Concurrent Engineering und Integrierte Produkt- und Produktionssystementwicklung dar sowie der übergreifenden Materialauswahlmethoden. Dabei werden nur die Gesamtansätze miteinander verglichen und nicht einzelne Bausteine.

Die Bewertung erfolgt anhand nachfolgender Kriterien:

- **Prozess:** Beim Prozess wird untersucht, ob der Ablauf der Prozesse parallel oder sequenziell erfolgt und welche Phasen betrachtet werden.
- **Auswahl:** Hier wird analysiert, welche Lösungen ausgewählt werden und ob die Auswahl integriert erfolgt.
- **Bewertung:** Es wird herausgearbeitet, welche Lösungen bewertet werden und ob die Bewertung integriert durchgeführt wird.
- **Bewertungskriterien:** Hier werden die Kriterien analysiert, nach denen die Lösungen bewertet werden (ökologisch, technisch und wirtschaftlich).

Viele der vorgestellten Ansätze sind sehr stark auf die Prozesssicht fokussiert. Dabei werden weitestgehend existierende Methoden, wie z.B. die QFD oder FMEA, eingebunden oder adaptiert. Gerade die Methoden aus dem Qualitätsbereich eignen sich zwar prinzipiell für eine integrierte Entwicklung, weil sie übergreifende Ziele verfolgen. Dennoch sind für weitergehende Verbesserungen an dieser Stelle innovative integrierte Methoden erforderlich.

Die vorgestellten Spezifikationstechniken sind wichtige Bausteine zum Sichern von bereits generiertem Wissen auf konzeptioneller Ebene und ermöglichen die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Produktlösungen und Produktionssystemlösungen. Sie beschreiben aber nur begrenzt, welchen Einfluss die verschiedenen Merkmale aufeinander haben.

Aus der Bewertung geht hervor, dass viele Ansätze zumindest makroskopisch eine parallele Prozessstruktur aufweisen. Im Detail können partiell sequentielle Abläufe oft nicht vermieden werden. Sowohl die Konzeptphase als auch die Detailphase werden dabei von den meisten Ansätzen abgedeckt. Eine frühzeitige Integration ist notwendig, um die Ergebnisse der Entwicklung signifikant zu verbessern.

Die Auswahl von Lösungen für Produkt, Prozess und Material wird zwar in den untersuchten Vorgehensweisen angesprochen, die konkrete Auswahl jedoch mit bereits existierenden Methoden, die in den Ansatz eingebunden werden, durchgeführt. Potenzielle Kombinationen aus diesen Lösungen werden jedoch oft nicht übergreifend betrachtet.

Falls eine Bewertung durchgeführt wird, stehen meistens nur technische und wirtschaftliche Faktoren im Vordergrund. Die integrierte Bewertung von ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Aspekten wird nur bei Benders [Bend11] durchgeführt. Die Bewertung ist allerdings nur schematisch dargestellt und außerdem ist die Geometriesynthese auf Profilquerschnitte limitiert. Generell wird eine Bewertung fast immer angesprochen, die konkrete Umsetzung ist jedoch nicht ausreichend beschrieben.

Der Ansatz von Ashby und der Ansatz von Farag sind nicht nur auf die Auswahl von Materialien beschränkt, sondern integrieren auch die Auswahl der Fertigungstechnologien. Beide binden darüber hinaus Produktaspekte in die Auswahl mit ein.

Die Vorgehensweise beider Ansätze basiert auf zwei Hauptaktivitäten. Über Randbedingungen können nicht-umsetzbare Lösungen herausgefiltert werden, während im Anschluss die verbleibenden Lösungen klassifiziert werden. Dabei werden immer zwei Eigenschaftsterme gegenübergestellt und miteinander verglichen. Bei der Betrachtung mehrerer Kriterien wird das Klassifizieren dadurch erschwert und unübersichtlich, jedoch können Lösungen nacheinander ausgeschlossen werden. In beiden Ansätzen werden außerdem nur Fertigungstechnologien und keine Anlagen ausgewählt. Da die Vorgehensweisen aus dem Bereich der Materialauswahl entstanden sind, stehen vor allem technische Materialeigenschaften im Vordergrund.

Ansatz	Prozess			Auswahl				Bewertung				Kriterien		
	Paralleler Ablauf	Konzeptphase	Detailphase	Produktlösung	Prozess + Anlage	Material	Integriert	Produktlösung	Prozess/Anlage	Material	Integriert	Wirtschaftlich	Technisch	Ökologisch
Produktentwicklung														
Axiomatic Design														
Simultaneous Engineering/ Concurrent Engineering														
DFMA														
CFD nach Prasad														
SBCE														
Integrierte Produkt- und Produktionsentwicklung														
Eversheim et al.														
Gausemeier et al.														
Nordsiek														
Benders														
Integrierte Material und Prozessauswahlverfahren														
Ashby														
Farag														

voll erfüllt

größtenteils erfüllt

teilweise erfüllt

wenig erfüllt

nicht erfüllt

Tabelle 6: Analyse der wesentlichen Vorgehensweisen aus dem Stand der Technik

Gerade bei der CES-Software [Gran15] werden die Möglichkeiten, die die umfangreiche Datenbank bietet, nicht ausreichend ausgeschöpft. Die Werte finden zwar beim Filtern und Klassifizieren Anwendung, jedoch wären umfassendere Bewertungen wünschenswert. Eine Verknüpfung und Verarbeitung der Einzelwerte für alternative Kombinationen aus Produkt-, Produktions- und Materiallösungen findet nicht statt.

Eine tiefere Integration der Entwicklungsprozesse wird prinzipiell durch das unterschiedliche Verständnis der verschiedenen Phasen und Ergebnisse innerhalb der Fachbereiche erschwert.

In Tabelle 7 sind alle im Stand der Technik vorgestellten Bewertungsmethoden gegenübergestellt. Die klassischen Bewertungsmethoden adressieren oft nur ein oder zwei Bewertungskriterien. Eine integrierte technisch-wirtschaftlich-ökologische Bewertung wird nicht durchgeführt. Müller-Langer und Benders kombinieren schließlich einzelne Bewertungsmethoden zu einer technisch-wirtschaftlich-ökologischen Bewertung. Müller-Langer bewertet zwar die technischen,

wirtschaftlichen und ökologischen Eigenschaften, stellt jedoch jeweils nur zwei Kriterien gegenüber und hat die Vorgehensweise für Herstellungsverfahren in der Prozessindustrie und nicht für technische Produkte entwickelt.

Benders wendet die integrierte technisch-wirtschaftlich-ökologischen Bewertung auf technische Produkte an, erwähnt jedoch mögliche Bewertungsmethoden nur beiläufig.

Ansatz	Prozess			Auswahl				Bewertung				Kriterien		
	Paralleler Ablauf	Konzeptphase	Detailphase	Produktlösung	Prozess + Anlage	Material	Integriert	Produktlösung	Prozess/Anlage	Material	Integriert	Wirtschaftlich	Technisch	Ökologisch
Technische Bewertungsmethoden														
gew. Punktbewert.								●	◐	◐	◐	◐	●	◐
Nutzwertanalyse								●	◐	◐	◐	◐	●	◐
Werkzeuge DF								◐	●	◐	◐	◐	●	◐
Wirtschaftliche Bewertungsmethoden														
Datenbanken								○	●	●	◐	●	○	○
Investitionsrechnung								○	●	○	○	●	○	○
Lebenszykluskosten								◐	●	●	●	●	○	○
Ökologische Bewertungsmethoden														
Ökobilanz								●	●	●	●	○	○	●
CO ₂ -Bilanz								◐	●	●	●	○	○	●
kum. Energieaufwand								◐	●	●	●	○	○	●
Ressourcenkritikalität								○	○	●	○	◐	○	●
Energieplanungs-DB								◐	●	○	◐	◐	○	●
MIPS								◐	◐	●	◐	○	○	●
Technisch-Wirtschaftliche-Ökologische Bewertungsmethoden														
Tech.-Wirtschaftl.								●	◐	●	◐	●	●	◐
Müller-Langer								○	●	◐	◐	●	●	●
Benders								●	◐	●	●	◐	◐	◐

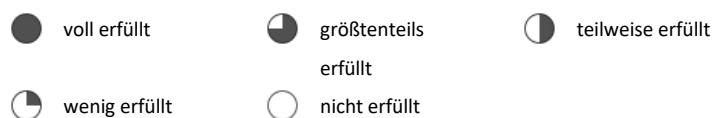


Tabelle 7: Analyse der Bewertungsmethoden aus dem Stand der Technik

Vor diesem Hintergrund soll die Arbeit die in Tabelle 8 aufgezeigten Defizite ausräumen. Diese Defizite werden in Kapitel 6 durch die verschiedenen Bestandteile des Gesamtkonzepts adressiert.

Defizite	Forschungsfrage	Bestandteil des Gesamtkonzepts
Begriffe zwischen den Fachbereichen (in Bezug auf die Entwicklungsphasen und deren Ergebnisse) unterschiedlich	Forschungsfrage 1	Einheitliche Beschreibung
Integrierte Auswahl von Produkt, Produktion und Material innerhalb der Entwicklung nicht ausreichend berücksichtigt	Forschungsfrage 2	Prozess
Methodische Unterstützung bei der integrierten Bewertung und Auswahl von Kombinationen aus Produkt-, Produktions- und Materiallösung ist unzureichend	Forschungsfrage 3	Methode
Ökologische, technische und wirtschaftliche Kriterien nur in wenigen Ausnahmen kombiniert betrachtet	Forschungsfrage 3	Methode
Einzelwerte aus bestehenden Datenbanken nicht effizient eingebunden	Forschungsfrage 4	IT

Tabelle 8: Defizite bisheriger Vorgehensweisen und Ansätze

6 Integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material

Im folgenden Kapitel wird das Gesamtkonzept für die integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material, bestehend aus einer einheitlichen Beschreibung, einem integrierten Definitionsprozess, einer übergreifenden Bewertungs- und Auswahlmethode und einer Softwarelösung vorgestellt (siehe Abbildung 47).

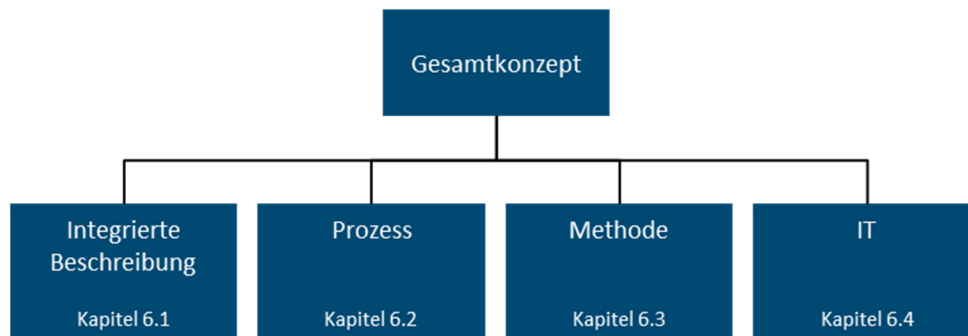


Abbildung 47: Bestandteile des Gesamtkonzepts der Arbeit

Eine konsistente Beschreibung der Entwicklungsprozesse der verschiedenen Fachbereiche und der zu entwickelnden Systeme bildet die Grundlage (Kapitel 6.1). Darauf aufbauend wird in Kapitel 6.2 ein integrierter Definitionsprozess vorgestellt, der den Fokus auf die übergreifende Bewertung und Auswahl von alternativen Lösungen aus den beteiligten Fachbereichen legt.

Zur Bewertung und Auswahl wurde in Kapitel 6.3 eine entsprechende Methode — der integrierte morphologische Kasten — entwickelt. Diese ermöglicht bereits in der Konzeptphase eine Bewertung verschiedener Lösungskombinationen aus Wirkprinzip, Technologie und Materialsubklasse. In der späteren Detaillierung können mithilfe dieser Methode auch Produktmerkmale, Prozess- und Anlagenmerkmale und Materialien evaluiert werden.

Die vorgestellte Methode benötigt ökologische, technische und wirtschaftliche Daten über die Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen, die durch die Anwendung etablierter Methoden bereitgestellt werden können. In Kapitel 6.4 wird abschließend ein Software-Prototyp vorgestellt, der den Anwender bei konkreten Aufgabenstellungen bei der Lösungsbewertung und -auswahl unterstützt.

6.1 Integrierte Beschreibung von Produkt-, Produktions- und Materialdefinition

Aufgrund der sehr heterogenen Begrifflichkeiten innerhalb der verschiedenen Fachbereiche Produktdefinition, Produktionsdefinition und Materialdefinition ist zunächst eine konsistente Beschreibung erforderlich. Im Vordergrund stehen hierbei die einzelnen Entwicklungsphasen sowie deren Ergebnisse. Aufbauend auf einer gemeinsamen Beschreibung kann im nächsten Schritt eine Verknüpfung der spezifischen Entwicklungsphasen und -ergebnisse realisiert werden. Die verwendeten Begriffe sind teilweise ungewohnt, wurden jedoch mit dem Ziel der konsistenten Beschreibung eingesetzt.

In Abbildung 48 sind in Anlehnung an [SKBV17b] die einzelnen Prozessphasen aus Produkt-, Produktions- und Materialdefinition mit ihren Ergebnissen schematisch gegenübergestellt. Vorarbeiten dazu wurden in [SBFV15] und [StVi15] veröffentlicht.

Die zeitlichen Abhängigkeiten untereinander sind nicht im Fokus dieser Darstellung und werden später bei der Prozesssicht adressiert. Bei der Gegenüberstellung der Phasen erscheint, basierend auf der in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 dargestellten Einteilung, die Gliederung in eine Spezifikationsphase (I), Konzeptphase (II), Komponenten-/Detailphase(III) und Systemintegrationsphase (IV) sinnvoll.

Im Vergleich zu [SBFV15] wurden die Prozessphasen um eine vorgelagerte Spezifikationsphase (D0, P0, M0) und eine nachgelagerte Integrationsphase (D4, P4, M4) ergänzt. Außerdem ist in der Produktionsdefinition eine Phase zur abstrakten Beschreibung der Funktionen des Produktionssystems vor der Technologieauswahl hinzugekommen und das Prozess-Design und die Prozessspezifizierung werden in der detaillierten Prozessentwicklung und Anlagenentwicklung zusammengefasst. Des Weiteren wurde die Konzept- und Layoutebene zu einer Konzeptphase zusammengefasst.

Die Entwicklung beginnt mit der Spezifikationsphase **(I)**, in der alle für das Produkt, das Produktionssystem oder das Material relevanten Anforderungen ermittelt und dokumentiert werden. Diese kann für alle drei Bereiche zusammen oder auch getrennt erfolgen.

In der darauffolgenden Konzeptphase **(II)** werden in den einzelnen Fachbereichen Konzepte entwickelt, die die Anforderungen erfüllen können. Ausgehend von abstrakten Produktfunktionen, Produktionsfunktionen und Materialeigenschaften erfolgt innerhalb der jeweiligen Fachbereiche die Suche nach Teillösungen, die sich zu einer möglichen Gesamtlösung kombinieren lassen.

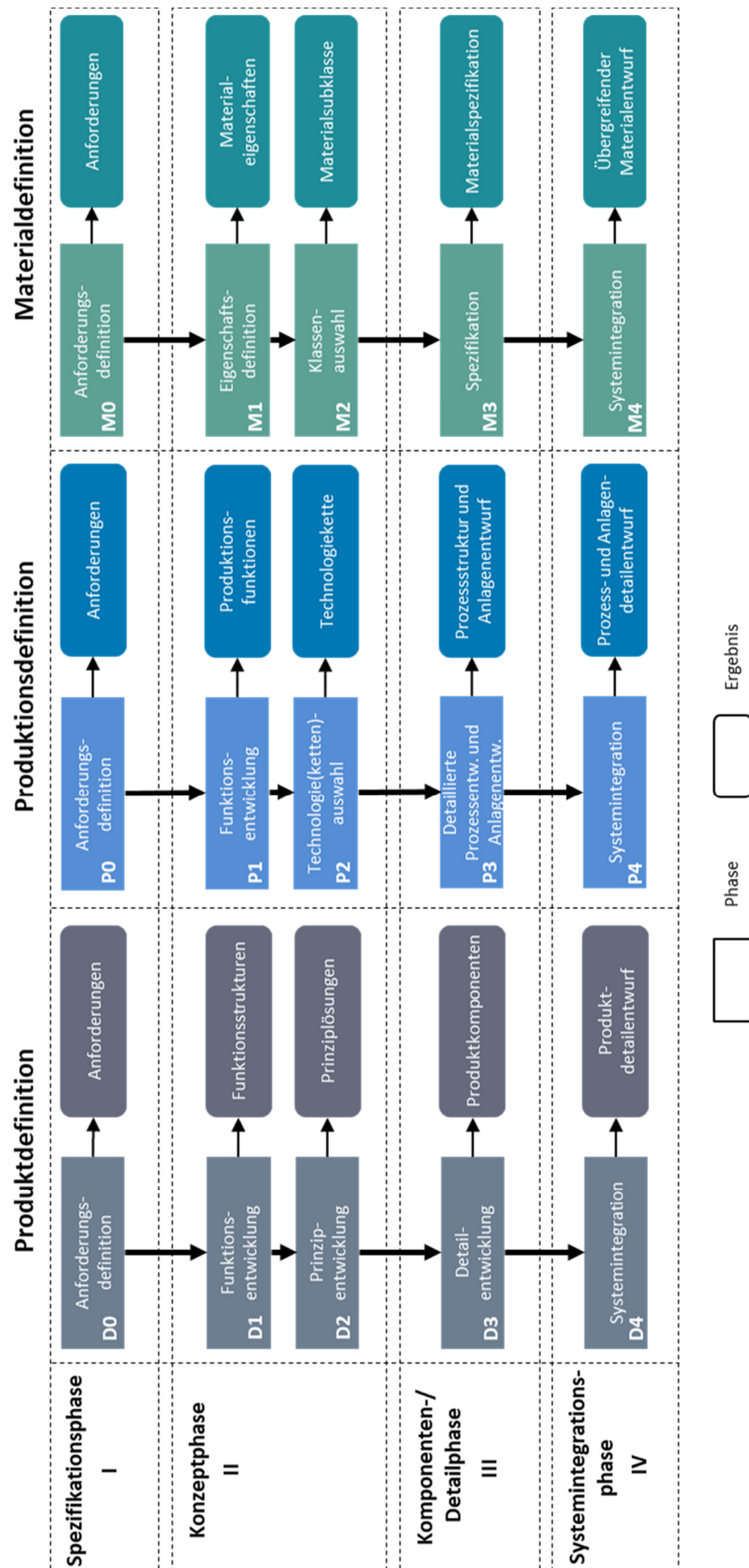


Abbildung 48: Gegenüberstellung und Gliederung der Entwicklungsphasen und -ergebnisse von Produkt-, Produktions- und Materialdefinition (in Anlehnung an [SKBV17b], basierend auf [SBFV15] und [StVi15])

Die Ausgestaltung der in der Konzeptphase erarbeiteten Konzepte wird in der anschließenden Komponenten-/Detaillierungsphase **(III)** durchgeführt. In dieser Phase werden alle Merkmale vollständig festgelegt.

Abschließend erfolgt in der Systemintegrationsphase **(IV)** eine Integration innerhalb der Fachbereiche zu den finalen Gesamtsystemen Produkt, Material und Produktionssystem.

6.1.1 Produktdefinition

Die in Abbildung 48 dargestellte Struktur der Produktdefinition lehnt sich an die VDI-Richtlinie 2221 [VDI2221] an. In der Anforderungsdefinition **(D0)** werden zunächst aus den Bedürfnissen verschiedener Stakeholder alle für das Produkt relevanten Anforderungen (z.B. die Abmessungen) abgeleitet. Möglichst quantifizierbare Angaben sind die Voraussetzung für eine spätere Bewertung von Lösungen hinsichtlich der Anforderungserfüllung.

Die anschließende Funktionsentwicklung **(D1)** befasst sich mit der Aufstellung und hierarchischen Gliederung aller Produktfunktionen (Funktionsstrukturen), die erforderlich sind, um die Anforderungen zu realisieren. Eine abstrakte Beschreibung der Entwicklungsaufgabe vergrößert den potenziellen Lösungsraum und ermöglicht dadurch auch die Generierung unkonventioneller Lösungen.

Im nächsten Schritt, der Prinzipientwicklung **(D2)**, erfolgt die Suche nach Wirkprinzipien, die diese Funktionen erfüllen können. Die Kombination mehrerer Wirkprinzipien resultiert in einer prinzipiellen Lösung [PBFG06]. Durch die Generierung alternativer prinzipieller Lösungen (Prinziplösung) in Kombination mit einer anschließenden Bewertung können die Ergebnisse der Konzeptphase verbessert werden. Außerdem ermöglicht der Umgang mit Lösungsmengen entsprechend dem Set-Based Concurrent Engineering ([WaSe89a, WaSe89b]) verzögerte Entscheidungen und dadurch flexiblere Produkte.

In der Detailentwicklung **(D3)** werden die verschiedenen Komponenten des gewählten Konzepts bzw. der gewählten Konzepte mithilfe etablierter Werkzeuge wie CAD, FEM usw. ausgestaltet. Am Ende der Phase sind die Merkmale aller Produktkomponenten festgelegt.

In der darauffolgenden Systemintegrationsphase **(D4)** erfolgt die Verknüpfung der zuvor ausgearbeiteten Produktkomponenten zu einem finalen Gesamtsystem. Der Produktdetailentwurf, mit Ableitung der Fertigungszeichnungen usw., stellt schließlich das Ergebnis dieser Phase und damit auch der Produktdefinition dar.

Während der Produktdefinition erfolgt eine stetige Überprüfung, ob die erarbeiteten Lösungen die Anforderungen erfüllen. Ist dies nicht der Fall, wird die entsprechende Lösung nachgebessert oder verworfen.

6.1.2 Produktionsdefinition

Die Produktionsdefinition beschreibt alle Tätigkeiten, die erforderlich sind, um das Produkt entsprechend der vorherrschenden Randbedingungen, wie z.B. Stückzahl, monatliche Ausbringungsmenge usw. herzustellen. Da dieser Begriff eher weniger etabliert ist, wird darauf im Folgenden detaillierter eingegangen.

In Abbildung 48 sind die Hauptaktivitäten der Produktionsdefinition dargestellt. Dabei wurden vor allem die sehr heterogenen Begrifflichkeiten aus Kapitel 3.2.2 vereinheitlicht. Während der Anforderungsdefinition (**P0**) werden alle für die Produktion relevanten Anforderungen aus den Bedürfnissen des Marktes und anderer Stakeholder abgeleitet. Quantifizierbare Anforderungen sind aufgrund ihrer besseren Überprüfbarkeit auch hier zu favorisieren.

Im Anschluss daran erfolgt in der Funktionsentwicklung (**P1**) auf Basis der Wirkprinzipien (physikalischer Effekt in Kombination mit geometrischen und stoffliche Merkmalen) die Bestimmung aller maßgeblich an der Wertschöpfung beteiligten Produktionsfunktionen. Unter Produktionsfunktionen versteht Wu alle erforderlichen Operationen, die zur Herstellung eines Teils erforderlich sind [Wu94]. Reyes-Peréz definiert Produktionsfunktionen als lösungsneutrale Operationen zur Beschreibung von Herstellungsprozessen [Reye10]. In ihrer Arbeit betrachtet Pérez die Verfahren der Hauptgruppen (siehe Abbildung 49) und Gruppen der DIN 8580 [DIN8580] als Produktionsfunktionen [Reye10].

Bei dieser Betrachtungsweise steht jedoch der Zweck der Produktionsfunktion nicht so stark im Vordergrund, der nach [PoLi08] ein Kriterium für eine Funktion ist. Es stellt sich konkret die Frage, welchen Zweck beispielsweise das Verfahren *Trennen* hat.

Fallböhrer teilt dagegen die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren in formgebende, formverändernde, fügende und eigenschaftsverändernde Verfahren ein (siehe Abbildung 49) [Fall00]. Die formverändernden Verfahren können ausgehend von einem Vorprodukt ebenfalls die initiale Form herstellen. Diese Einteilung orientiert sich stärker an der eigentlichen Funktion der Verfahren. So ist beispielsweise der Zweck der trennenden Verfahren, die Bauteilform zu verändern. Diese Kategorien werden daher in der Arbeit als grundlegende Produktionsfunktionen betrachtet.

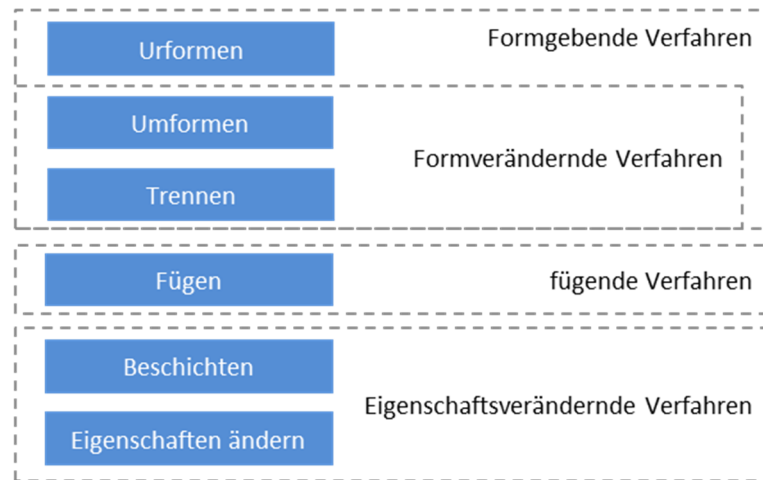


Abbildung 49: Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN8580 [DIN8580], gegliedert nach [Fall00]

Das zuvor beschriebene Verständnis von Produktionsfunktionen ist zweckorientiert, lösungsneutral und beschreibt die Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsobjekt und deckt sich somit mit den Kriterien der Definition von Funktionen nach [PoLi08].

Es lassen sich schließlich folgende grundlegende Produktionsfunktionen festhalten:

- Form herstellen
- Form verändern
- Komponenten fügen
- Eigenschaften ändern

Die Funktionen können analog zur Produktentwicklung weiter detailliert werden. In Abbildung 50 sind beispielhaft die für die Herstellung des Wirkprinzips *Zahnradkombination* benötigten Produktionsfunktionen dargestellt:

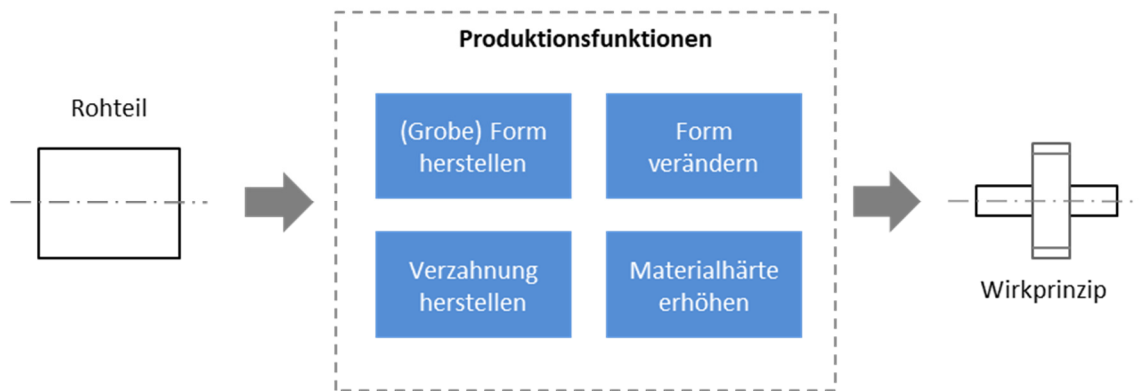


Abbildung 50: Produktionsfunktionen für die Herstellung einer Zahnradkombination

Die Produktionsfunktion „Teile fügen“ bezieht sich hier auf das Zusammenfügen zweier Körper zur Herstellung eines Bauteils, nicht auf die Montage zweier Bauteile.

Sobald alle maßgeblich an der Wertschöpfung beteiligten Produktionsfunktionen identifiziert sind, erfolgt im Anschluss in der Technologie(ketten)auswahl (**P2**) zuerst die Suche nach potenziellen Technologien (Müller [Müll08] nennt diese Technologien Primärverfahren), welche die Produktionsfunktionen realisieren können. Diese Technologien werden im Anschluss zu Technologieketten kombiniert.

Mit Technologien sind nach der Definition von [Fall00] in dieser Arbeit die Fertigungsverfahren gemeint und folglich mit Technologieketten die Kombination potenzieller Technologien. Potenzielle Technologien zur Produktionsfunktionserfüllung können somit beispielsweise den Untergruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN8580] entnommen werden. Die Funktion „Verzahnung herstellen“ kann z.B. durch die Technologien Wälzfräsen oder Wälzschleifen umgesetzt werden.

Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit verwendeten Definition betrachtet Reyes-Peréz den Begriff *Technologie* als die Konkretisierung des Fertigungsverfahrens, welches die Funktion erfüllt [Reye10]. Obwohl die Terminologie unterschiedlich ist, erfüllen auch in diesem Ansatz die Untergruppen der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN8580] die Produktionsfunktionen.

Die Auswahl von Technologieketten beginnt mit der Suche nach potenziellen Technologien, die die ermittelten Produktionsfunktionen erfüllen können. Zur Unterstützung dieser Tätigkeit ist der Einsatz von Datenbanken sinnvoll.

Die Auswahl und anschließende Bewertung mehrerer alternativer Technologien verbessert die Ergebnisse der Technologieauswahl. Die vielversprechendsten Technologien werden schließlich in der nachfolgenden Technologiekettenauswahl verwendet.

Aus den maßgeblich an der Wertschöpfung beteiligten Technologien erfolgt die Erstellung der Technologiekette, also die Verkettung der verschiedenen zur Herstellung benötigten Technologien. In einem ersten Schritt werden die Technologien nach einer logischen Reihenfolge angeordnet, so dass vom Rohteil ausgehend entsprechend die Form angepasst und alle Merkmale hergestellt werden. Da bisher nur die maßgeblich an der Wertschöpfung beteiligten Technologien berücksichtigt wurden, müssen noch fehlende Technologien, z.B. nach Fallböhmer [Fall00] ergänzt werden.

Zunächst erfolgt eine Überprüfung ob alle Merkmale des Wirkprinzips mit den bereits ausgewählten Technologien herzustellen sind. Falls nicht, müssen fehlende Technologien hinzugefügt werden. Im Anschluss erfolgt eine Überprüfung der Zustände des Bauteils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Technologien. Entspricht der Ausgangszustand der vorangehenden Technologie nicht dem Eingangszustand der darauffolgenden Technologie müssen weitere Technologien eingefügt werden. [Fall00]

In Abbildung 51 ist die schematische Vorgehensweise bei der Suche nach Technologien ausgehend von den Wirkprinzipien dargestellt.

Die bis hierhin beschriebene Vorgehensweise betrachtet die Herstellung von Wirkprinzipien und berücksichtigt nicht die spätere Montage zu einem finalen Produkt.

Auch wenn die Montage kein Bestandteil dieser Arbeit ist, müsste bei der Konzeption der Montageprozesse analysiert werden, welche Wirkprinzipien separat hergestellt und später zusammengefügt werden, welche Wirkprinzipien in einem Bauteil realisiert werden können und welche Wirkprinzipien mehrere Bauteile erfordern. Durch diese Betrachtungsweise ließen sich auch Montageaspekte integrieren.

Da die Materialflusswege im Sinne einer schlanken und effizienten Produktion kurzgehalten werden sollten, lässt sich aus den Technologieketten zudem ein erstes grobes Layout ableiten.

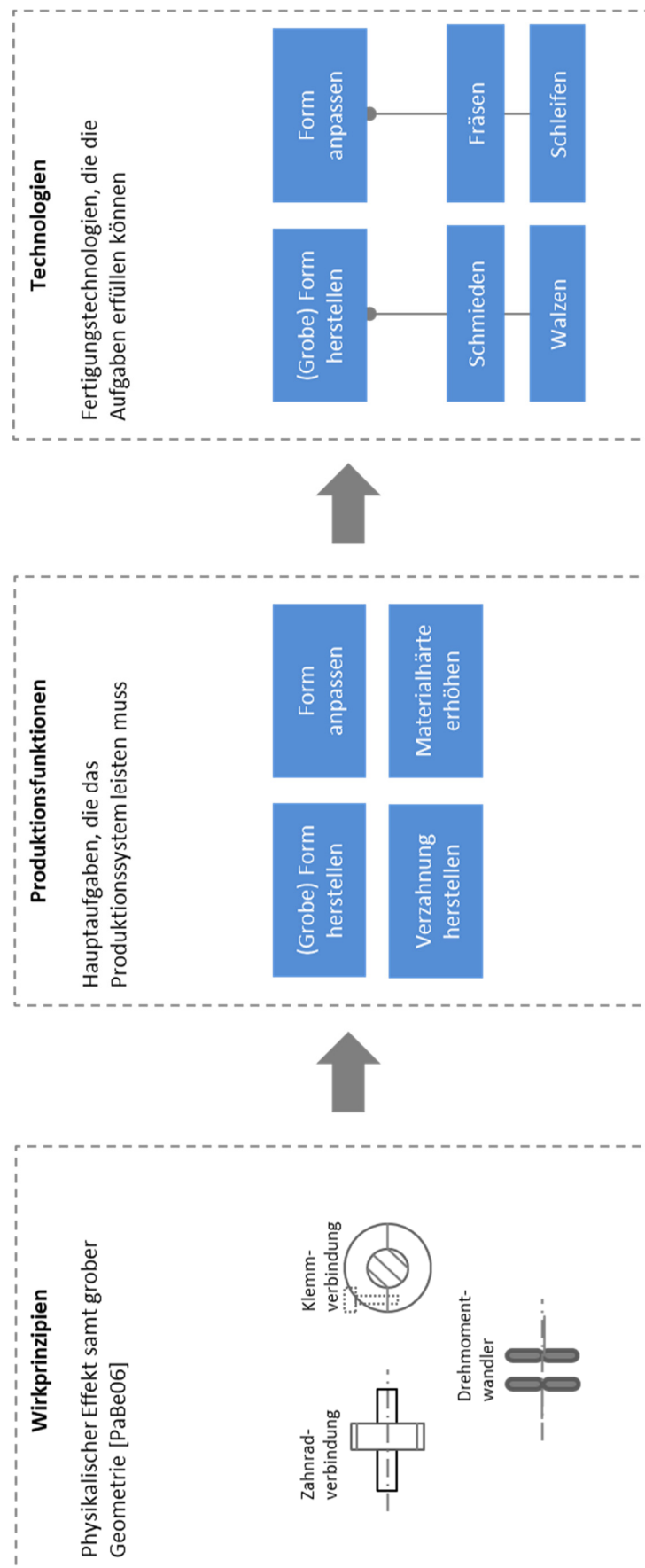


Abbildung 51: Entwicklung von Produktionsfunktionen und Technologien, basierend auf Wirkprinzipien

Während der detaillierten Prozessentwicklung und Anlagenentwicklung (**P3**) erfolgt die Verknüpfung zwischen den in der vorangegangenen Phase ausgewählten Technologien und entsprechenden Betriebsmitteln bzw. Produktionsanlagen (Komponenten des Produktionssystems), mit denen die Technologien realisiert werden können. Dazu kann beispielsweise eine Produktionsmittelmatrix nach Trommer [Trom01] eingesetzt werden. Sie legt fest welche Merkmale des Produktes mit welchen Anlagen hergestellt werden und ist unter anderem abhängig von den herzustellenden Merkmalen, dem Werkstoff und der Stückzahl.

Je nach Möglichkeit werden vorhandene Produktionsanlagen, Standardkomponenten oder individuelle Produktionsanlagen den verschiedenen Technologien zugeordnet. Die Entwicklung der individuellen Lösungen erfolgt dabei in der Anlagenentwicklung, z.B. nach der VDI-Richtlinie 4499 [VDI4499], die abhängig von den Unternehmen oft bei Zuliefererbetrieben durchgeführt wird. Bei der eigentlichen Entwicklung von Standardkomponenten, wie z.B. Robotern kann wiederum die Vorgehensweise der Produktdefinition angewendet werden.

Der Begriff *Komponente* beschreibt einerseits die verschiedenen Maschinen oder Anlagen innerhalb des Produktionssystems. Andererseits werden innerhalb der Anlagenentwicklung unter Komponenten z.B. die Baugruppen (Hydraulikzylinder) verstanden.

Zur Herstellung der Produktmerkmale auf einer Produktionsanlage sind außerdem eine Bestimmung der Bearbeitungsparameter und -abläufe sowie die Spezifikation der Operationen des zugehörigen Prozesses erforderlich. Die Entwicklung und anschließende Bewertung verschiedener Anlagenkonzepte mit Bearbeitungsparametern generiert bessere Ergebnisse.

Durch die Verknüpfung der Technologien mit Produktionsanlagen entsteht schließlich aus der Technologiekette die Prozessstruktur und der Anlagenentwurf, die neben den direkt wertschöpfenden Prozessen auch Lager-, Handhabungs- oder Transportprozesse enthält.

Die anschließende Systemintegration (**P4**) verknüpft die zuvor ausgearbeiteten Anlagen und Prozesse zu einem finalen Gesamtsystem. Der Prozess- und Anlagendetailentwurf stellt schließlich das Ergebnis dieser Phase und damit auch der Produktionsdefinition dar. In der Produktionsdefinition muss ebenfalls die Erfüllung der Anforderungen stetig überprüft werden.

6.1.3 Materialdefinition

Die Materialdefinition beginnt in der Phase der Anforderungsdefinition (**M0**) mit der Ermittlung der Anforderungen, die für die Materialien relevant sind. Die äußere Beanspruchung, wie z.B. ein hohes Biegemoment stellen Anforderungen an das Material dar. Sowohl die Wirkprinzipien und Produkthanforderungen des Produktes als auch die Technologien bestimmen einen Teil davon.

Aus den Anforderungen können in der darauffolgenden Eigenschaftsdefinition (**M1**) die erforderlichen Materialeigenschaften (z.B. hohe Steifigkeit) definiert werden. Hier können durchaus Widersprüche entstehen, die durch eine entsprechende Materialauswahl adressiert werden.

Im Anschluss erfolgt in der Klassenauswahl (**M2**) die Suche nach Materialsubklassen (z.B. Unlegierte Stähle), die die entsprechenden Eigenschaften aufweisen. Dazu wird innerhalb der Materialklassen nach geeigneten Materialsubklassen gesucht. Materialklassen geben zwar grobe Bereiche der Eigenschaften an, allerdings wäre die Streuung der Eigenschaften zu hoch, so dass die Aussagekraft nicht sehr deutlich ist. Die Auswahl und anschließende Bewertung alternativer Materialsubklassen generiert analog zu den anderen Fachbereichen auch hier bessere Ergebnisse bei der Lösungssuche.

In der Spezifikationsphase (**M3**) werden die Materialsubklassen weiter detailliert und schließlich alternative Materialien exakt spezifiziert (z.B. unlegierter Stahl 1.0308). Die Phase endet mit der Bewertung der alternativen Materialien hinsichtlich der Erfüllung der geforderten Eigenschaften und Anforderungen und der finalen Auswahl der zu verwendenden Materialien.

Abschließend erfolgt in der Systemintegration (**M4**) bei einem aus mehreren Materialien bestehenden System, die Verknüpfung aller verwendeten Materialien zu einem übergreifenden Materialentwurf. In dieser Phase kann das finale Zusammenwirken (Kontaktkorrosion, thermische Längenausdehnung) der Materialien überprüft werden.

Eine stetige Überprüfung, ob die Anforderungen erfüllt werden, ist Grundvoraussetzung.

Nach den fachbereichsspezifischen Systemintegrationsphasen ist eine umfassende übergreifende Evaluation der Ergebnisse aller Fachbereiche wünschenswert, in der das Zusammenspiel aller beteiligten Elemente überprüft wird.

6.1.4 Zusammenhänge zwischen Produkt, Material und Produktionssystem

Nachdem in den vorherigen Unterkapiteln die verschiedenen Entwicklungsphasen mit ihren Ergebnissen einheitlich beschrieben wurden, werden in diesem Unterkapitel die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den drei Elementen Produkt, Material und Produktionssystem herausgearbeitet (siehe Abbildung 52). Die Zusammenhänge werden dabei formalisiert beschrieben und als Matrix repräsentiert. Eine exakte Bestimmung der Matrizen kann jedoch sehr aufwändig sein.

Die zugrundeliegende Beschreibung basiert auf der CPM/PDD-Methode von Weber [Webe05].

Einerseits kann dieser Ansatz auf Produkte [Webe05], andererseits aber auch auf Produktionsanlagen [DZBW06] angewendet werden. Aus diesem Grund eignet er sich sehr gut für die Beschreibung im Rahmen dieser Arbeit. Abbildung 52 stellt keine Richtung der Fachbereiche dar, sondern visualisiert die Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen und Eigenschaften. In dieser Darstellung ist außerdem nur die Analyserichtung zwischen den Fachbereichen dargestellt. Ausgehend von den Anforderungen erfolgt die Ableitung von Eigenschaften/Funktionen (P_D), die das Produkt erfüllen muss. Diese Funktionen können nicht direkt, sondern nur über die Merkmale (C_D) vom Entwickler beeinflusst werden. Mehrere zusammenhängende Merkmale lassen sich zu einer Lösung (L_D) zusammenfassen. Da sich die Eigenschaften aus den Merkmalen zusammensetzen, werden hier nur die Merkmalkombinationen als Lösung betrachtet. [Webe05]

Funktionen (bzw. Eigenschaften bei Materialien) und Merkmale sind über eine Relationsmatrix (R_D) miteinander verknüpft. Sie beschreibt, wie die Merkmale (C_D) die tatsächlichen Eigenschaften (P_D) bzw. Funktionen beeinflussen (Analyserichtung). Für die Entwicklung neuer Produkte, wird die Syntheserichtung (repräsentiert durch die inverse Relationsmatrix (R_D^{-1})) verwendet, um von den erforderlichen Eigenschaften (PR_D) zu den Merkmalen (C_D) zu gelangen. Je nach Richtung können die aus den Merkmalen resultierenden Eigenschaften variieren. [Webe05]

Diese Beschreibung ist gleichermaßen auf das Produktionssystem und das Material anwendbar. Zur übergreifenden Darstellung, wird die Verknüpfung zwischen den Eigenschaften bzw. Funktionen, Merkmalen und Lösungen der verschiedenen Fachbereiche ergänzt. Im Folgenden wird beim Produkt und dem Produktionssystem nur noch von Funktionen gesprochen.

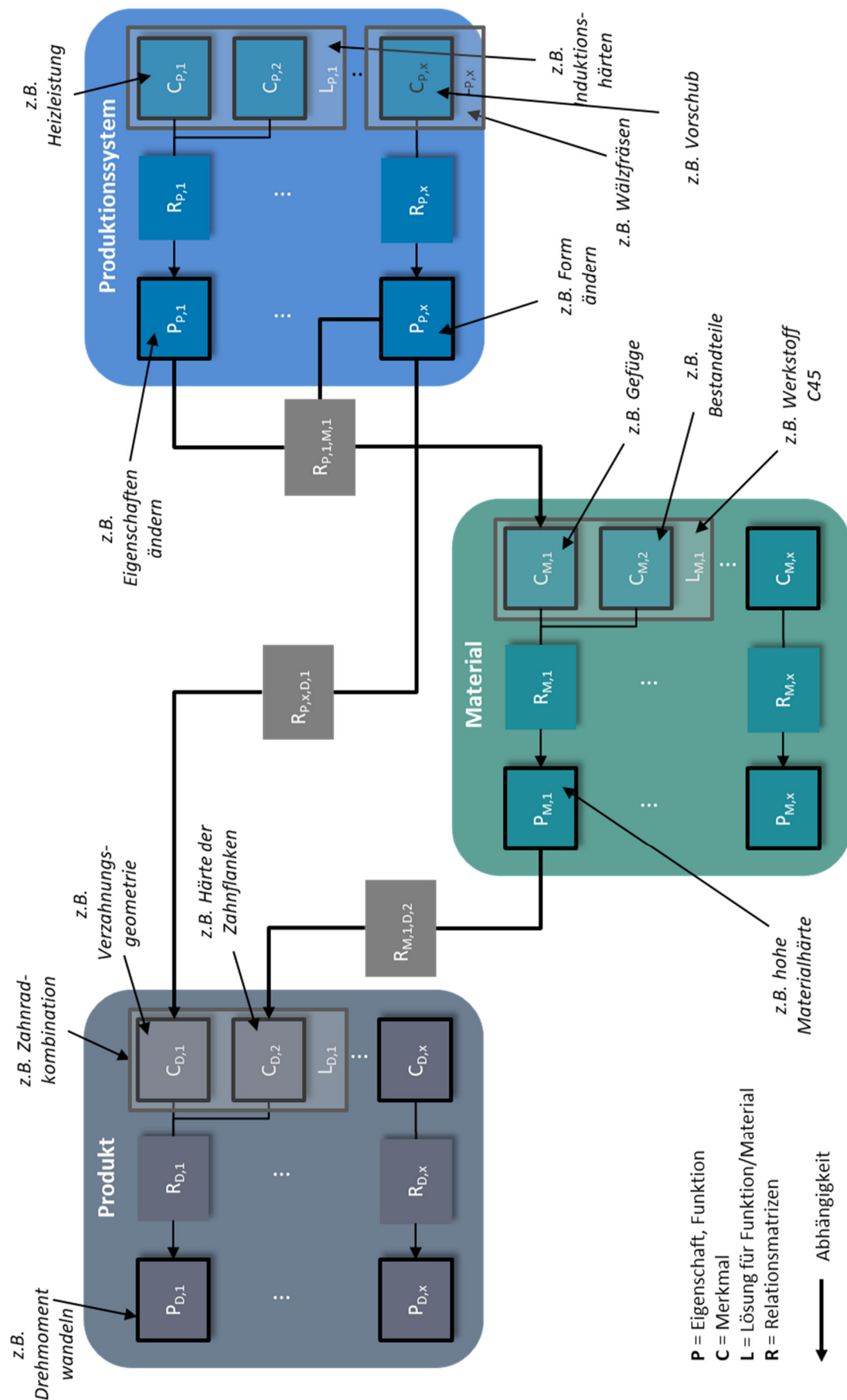


Abbildung 52: Abhängigkeiten zwischen Produkt, Produktionssystem und Material (in Anlehnung an [StVi15], basierend auf dem CPM-Ansatz von [Webe05] und [DZBW06])

Die drei Elemente beziehen sich in der in Abbildung 52 gezeigten Darstellung auf die detaillierten Systeme und müssen im Entwicklungsprozess erst präzisiert werden.

Bei der Verknüpfung existieren in Abhängigkeit der Produktionsfunktionen prinzipiell zwei Optionen: Die direkte Verbindung zwischen Produkt und Produktionssystem („Teile fügen“, „Form herstellen“ und „Form verändern“), wobei damit einhergehend auch Materialmerkmale verändert werden können, und die indirekte Verbindung über das Material (Funktion „Eigenschaften ändern“).

Bei der direkten Verbindung werden zur Herstellung der Produktmerkmale (C_D) in Syntheserichtung spezielle Produktionsfunktionen (P_P), die abhängig von den Materialeigenschaften sind, benötigt. Die Produktmerkmale (C_D) und Produktionseigenschaften (P_P) stehen über eine Matrix ($R_{P,D}$) in Relation zueinander. Zur Realisierung der Produktionsfunktionen (P_P) sind wiederum Merkmale (C_P), die über die Relationsmatrix R_P verknüpft sind, und die daraus zusammengesetzten Lösungen (L_P) erforderlich.

Zum besseren Verständnis können die Zusammenhänge an einem kurzen Beispiel (Getriebe) erklärt werden. Geht man von der Produktfunktion ($P_{D,1}$) „Drehmoment wandeln“ aus, kann diese Funktion beispielsweise von einer Zahnradkombination (Lösung $L_{D,1}$) erfüllt werden. Zu den Merkmalen der Zahnradkombination gehören z.B. die „geometrische Form der Welle“, die „Verzahnungsgeometrie“ ($C_{D,1}$), die „Anzahl der Zahnradpaarungen“ usw. Bei der Herstellung der Verzahnung ist beispielsweise die Produktionsfunktion ($P_{P,x}$) „Form ändern“ erforderlich. Diese Produktionsfunktion kann z.B. durch das „Wälzfräsen“ (Lösung $L_{P,x}$) realisiert werden, welches wiederum durch Merkmale, wie z.B. „Vorschub“ ($C_{P,x}$), „Drehzahl“ und „Schneidengeometrie“ definiert wird.

Die indirekte Verbindung erfolgt über eine Änderung der Materialmerkmale durch das Produktionssystem. In diesem Fall werden die Produktmerkmale (P_D) über die Relationsmatrix ($R_{M,D}$) durch die Materialeigenschaften (P_M) beeinflusst. Die Materialeigenschaften (P_M) stehen wiederum über eine Matrix (R_M) in Relation zu den Materialmerkmalen (C_M). Das Produktionssystem wirkt schließlich durch die Eigenschaften (P_P) über die Relationsmatrix ($R_{P,M}$) bei der Herstellung auf die Materialmerkmale (C_M) ein.

Das Merkmal „Zahnflankenhärte“ ($C_{D,2}$) wird beispielsweise durch die Eigenschaften des Materials („hohe Materialhärte“ ($P_{M,1}$)) über eine Relationsmatrix (in diesem Fall eine skalare Eins) konstituiert. Diese Eigenschaft hängt wiederum von dem Material (z.B. „C45“ ($L_{M,1}$)) und dessen Merkmalen (z.B. „Gefüge“ ($C_{M,1}$), „Bestandteile“ ($C_{M,2}$)) ab. Die Merkmale des Materials können

über Relationsmatrizen durch die Eigenschaften/Funktionen (z.B. „Eigenschaften ändern“ ($P_{P,1}$)) des Produktionssystems, welche wiederum durch die Merkmale $C_{P,1}$ (z.B. „Heizleistung“) der Lösung Induktionshärten ($L_{P,1}$) konstituiert werden, hergestellt werden.

In Analyserichtung werden die Relationsmatrizen R angewandt, während bei der Syntheserichtung die inversen Matrizen R^{-1} Verwendung finden. Auf die Unterscheidung zwischen erforderlichen Eigenschaften und tatsächlichen Eigenschaften wird an dieser Stelle aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Vorgehensweise ist analog zu [Webe05] und kann in Kapitel 3.2.1 nochmal nachgelesen werden.

Die in Abbildung 52 dargestellten Pfeile zeigen die prinzipiellen Abhängigkeiten zwischen den Elementen. Selbstverständlich kann beispielsweise eine Materialeigenschaft auch mehrere Produktmerkmale oder eine Produktionsfunktion Produkt- und Materialmerkmale beeinflussen.

Neben der hier präsentierten Darstellung und Beschreibung existieren in der Literatur weitere Ansätze, wie z.B. [Reye10], [MiJE15] (siehe Kapitel 4.2) oder [Suh90] (siehe Kapitel 3.2.1). Die hier präsentierte Darstellung geht jedoch über die bisherigen hinaus, da sie sehr gut beschreibt, wie die verschiedenen Elemente bei der Herstellung voneinander abhängen und auch Materialaspekte in diese Betrachtung integriert.

6.2 Integriertes Prozessmodell zur Definition von Produkt, Produktion und Material

In diesem Kapitel wird das integrierte Prozessmodell vorgestellt, welches auf den in Kapitel 6.1 erarbeiteten Grundlagen aufbaut und die übergreifende Definition von Produkt, Produktion und Material adressiert. Abbildung 53 zeigt das integrierte Prozessmodell nach [SKBV17b]. Es baut auf der in Abbildung 1 dargestellten Übersicht des Produktlebenszyklus auf. Vorüberlegungen zu dem Prozessmodell sind in [SLGV14] und [StVi16a] veröffentlicht.

Die Erweiterung der fachbereichsspezifischen Entwicklungsprozesse um integrierte Prozessschritte, in denen Lösungen integriert bewertet und ausgewählt werden (siehe Kapitel 6.2.1), ist der zentrale Ansatzpunkt für einen übergreifenden Prozess. Bei der Auswahl von Lösungen wird mit Lösungsmengen gearbeitet, um die Unsicherheiten bei der frühen Bewertung zu kompensieren und eine gewisse Flexibilität zu erreichen [WaSe89a, WaSe89b] (siehe Kapitel 4.1). Der Entwicklungsprozess beginnt mit einer Spezifikationsphase der beteiligten Fachbereiche Produkt-, Produktions- und Materialdefinition, in der die jeweiligen Anforderungen ermittelt werden. Die Anforderungen beeinflussen sich hierbei gegenseitig. Die später generierten Wirkprinzipien haben beispielsweise einen Einfluss auf die Material- und Produktionsanforderungen. Eine gemeinsame Spezifikationsphase mit anschließender Aufteilung in die drei Bereiche wäre auch möglich.

Nach erfolgreicher Ermittlung aller initialen Anforderungen an das Produkt, Produktionssystem und Material sind die ersten Meilensteine $MS_{x,i}$ erreicht.

Auf Basis der Anforderungen lassen sich in der Konzeptphase der Produktdefinition die erforderlichen Produktfunktionen herleiten. Im Anschluss daran werden alternative Wirkprinzipien gesucht, die die gewünschten Funktionen bereitstellen können.

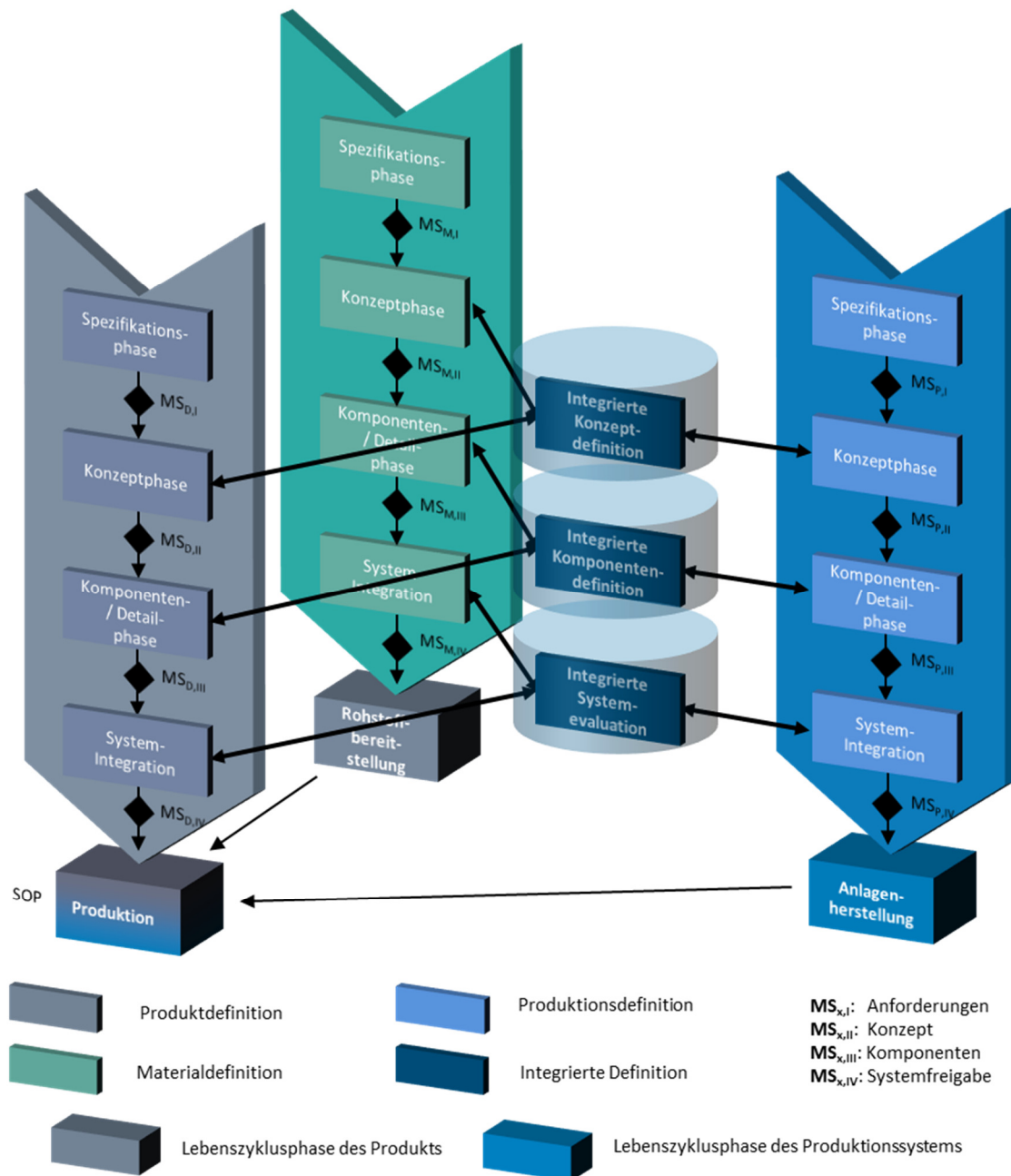


Abbildung 53: Integriertes Prozessmodell (in Anlehnung an [SKBV17b], basierend auf [SLGV14], [StVi16a])

Die Konzeptphase der Produktionsdefinition leitet auf Basis dieser Wirkprinzipien und der Produktionsanforderungen Produktionsfunktionen her, die zur Herstellung der Wirkprinzipien erforder-

derlich sind. Zur Realisierung der Produktionsfunktionen werden alternative potenzielle Technologien gesucht. In der Konzeptphase der Materialdefinition wird in Abhängigkeit der Wirkprinzipien und Materialanforderungen die Ermittlung der erforderlichen Materialeigenschaften durchgeführt. Es folgt die Suche nach alternativen Materialsubklassen, die diese Eigenschaften erfüllen. Die Auswahl potenzieller Technologien und Materialsubklassen ist eng miteinander verknüpft.

In der integrierten Konzeptdefinition (siehe Kapitel 6.2.2) werden schließlich die alternativen Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen übergreifend bewertet und eingegrenzt. Das Ergebnis sind alternative Kombinationen aus einem Wirkprinzip sowie der zu verwendenden Materialsubklassen, verknüpft mit entsprechenden Technologien zur Herstellung. Diese Ergebnisse, also die Auswahl an Alternativen, die in der nächsten Phase weiterentwickelt werden sollen, werden an die einzelnen Fachbereiche geleitet. In der Produktdefinition erfolgt die Kombination der besten Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungen, während in der Produktionsdefinition die Herstellungstechnologien nach [Fall00] vervollständigt werden. Nach erfolgreicher Durchführung sind die Meilensteine $MS_{x,II}$ erreicht.

In der Komponenten- bzw. Detailphase erfolgt die Ausgestaltung bzw. Detaillierung der zuvor ausgewählten alternativen Konzepte in den jeweiligen Fachbereichen. Für jede Konzeptalternative werden wiederum mehrere alternative Produktkomponenten, Anlagen mit den dazugehörigen Prozessen sowie Materialien generiert bzw. ausgewählt. Die Entwicklung alternativer Ausführungen für die Komponenten der verschiedenen Produktkonzepte, d.h. die Festlegung alternativer Produktmerkmale, erfolgt in der Produktdefinition. Die Produktionsdefinition ordnet den verschiedenen Produktionskonzepten in Abhängigkeit der Komponentenausführungen des Produktes alternative Produktionsanlagen mit entsprechenden Bearbeitungsparameter zu und veranlasst je nach Szenario die Entwicklung neuer Produktionsanlagen. In der Materialdefinition erfolgt die Suche nach geeigneten Materialien innerhalb der Materialsubklassen. Fachbereichsspezifische Simulations- und Evaluierungsmethoden unterstützen diese Phasen und ermöglichen bereits eine frühe Eliminierung nicht umsetzbarer Lösungen innerhalb der Fachbereiche sowie eine Überprüfung der Anforderungserfüllung. Sowohl die alternativen Produktkomponenten als auch die Anlagen mit den dazugehörigen Prozessen sowie die Materialien werden schließlich in der integrierten Komponentendefinition (siehe Kapitel 6.2.3) übergreifend bewertet. Auf Grundlage

dieser Bewertung erfolgt anschließend die Auswahl der finalen Kombination daraus. Die Entscheidung wird an die entsprechenden Fachbereiche weitergeleitet, womit die Meilensteine $MS_{x,III}$ erfüllt sind.

In der Systemintegrationsphase der Fachbereiche erfolgt die Integration der in der vorherigen Phase ausgestalteten Produktkomponenten, der Anlagen mit den dazugehörigen Prozessen sowie der detaillierten Materialien zu dem jeweiligen Gesamtsystem. In der Produkt-, Produktions- und Materialdefinition wird jeweils das finale System nochmals auf die Erfüllung der Anforderungen hin untersucht und das Zusammenspiel innerhalb des Systems überprüft. Im Anschluss erfolgt in der integrierten Systemevaluation (siehe Kapitel 6.2.4) die übergreifende Analyse der ökologischen, herstellungstechnischen und wirtschaftlichen Kennwerte der drei Systeme. Nach erfolgreichem Abschluss der Prüfung, sind die letzten Meilensteine $MS_{x,IV}$ erreicht. Der integrierte Prozessschritt liefert gleichzeitig wichtige Informationen für die finale Dokumentation bezüglich der Umweltauswirkungen und der Wirtschaftlichkeit.

Sobald alle Systeme vollständig dokumentiert sind und das Produktionssystem realisiert wurde kann die Herstellung des Produktes erfolgen (SOP).

Um eine noch größere Flexibilität zu erreichen, ist es auch denkbar, die alternativen Produktkomponenten, die Anlagen mit den dazugehörigen Prozessen sowie die Materialien einzugrenzen, anstatt sie in der Komponentenphase festzulegen. Die Auswahl kann in der Systemintegrationsphase zu alternativen Systemen integriert und im Anschluss evaluiert werden.

Im Rahmen einer Neukonstruktion wird der gesamte Prozess durchlaufen, während bei einer Änderungs- oder Variantenkonstruktion die Konzeptphase übersprungen werden kann.

An jedem Meilenstein erfolgt die Entscheidung, ob die Ergebnisse mit den Anforderungen übereinstimmen oder die letzte Phase wiederholt werden muss.

6.2.1 Übergreifende Bewertung und Auswahl von Kombinationen alternativer Lösungen

Das integrierte Prozessmodell aus Kapitel 6.2 setzt eine übergreifende Bewertung aller Kombinationen alternativer Lösungen und deren Auswahl voraus. Dazu wurde das in Abbildung 54 dargestellte allgemeine Bewertungsschema entwickelt, dass mit Verwendung von etablierten ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Bewertungsmethoden diese Forderung adressiert.

Für die in den jeweiligen Fachbereichen entwickelten Lösungen werden, je nach Szenario, der Datenlage und der betrachteten Umweltkriterien, verschiedene ökologische, technische und wirtschaftliche Bewertungen getrennt durchgeführt und die Ergebnisse über Gewichtungsfakto-

ren miteinander verrechnet. Eine getrennte Bewertung mit anschließender Verrechnung ist effizient umsetzbar, da auf vorhandene Datenbanken zurückgegriffen werden kann. Die Bewertung soll, wenn möglich, nicht nur einzelne Lebenszyklusphasen, sondern den gesamten Lebenszyklus erfassen.

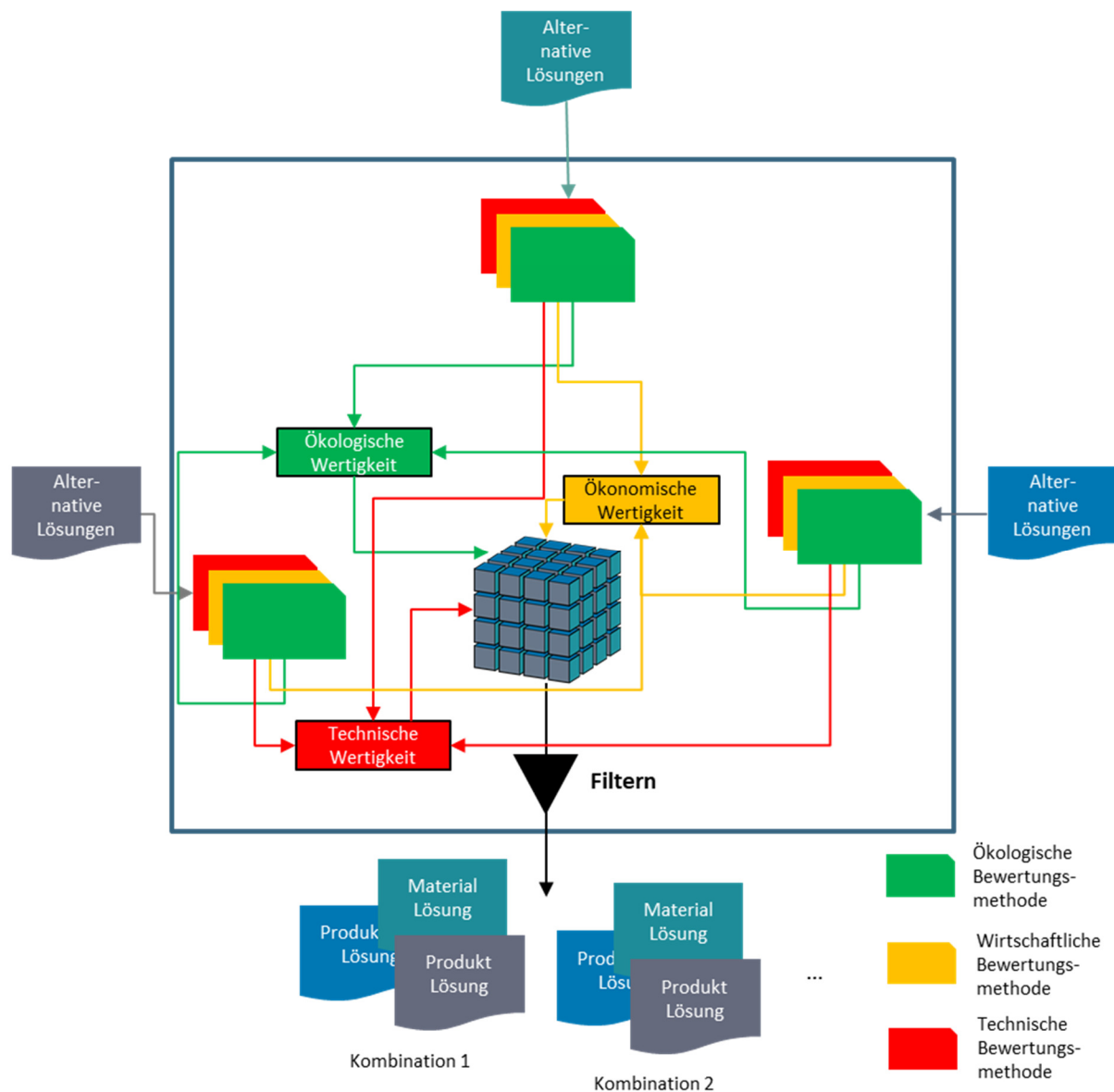


Abbildung 54: Allgemeines Schema der übergreifenden Bewertung und Auswahl von Kombinationen potenzieller alternativer Lösungen

Bei dem in Abbildung 54 gezeigten Schema ist es möglich, verschiedene Kennwerte für die ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der einzelnen Lösungen zu bestimmen und auch auf alternative Bewertungsmethoden zurückzugreifen, je nachdem, welche sich im vorliegenden Szenario am besten eignen. Im späteren Verlauf der Arbeit werden etablierte Bewertungsmethoden verwendet, die sich sehr effizient und in frühen Phasen einsetzen lassen.

Eine Verwendung anderer Methoden ist ebenfalls möglich. Des Weiteren werden nicht alle Kriterien für die jeweiligen Lösungen einer Kombination getrennt ermittelt, da beispielsweise die wirtschaftlichen Kennwerte einer Kombination in der Konzeptphase maßgeblich von dem Material und der Technologie geprägt sind.

Im Anschluss erfolgt die Verarbeitung der berechneten Werte zu jeweils einer ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Wertigkeit für eine Kombination aus Produkt-, Produktions- und Materiallösung. Voraussetzung ist eine Skalierung (0 bis 10) aller Wertigkeiten (W_n), um im Anschluss mithilfe von Gewichtungsfaktoren (g) eine Gesamtwertigkeit ($W_x(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1})$) zu berechnen. Dabei werden jeweils alle ermittelten Kennwerte eines Kriteriums (ökologisch, technisch, wirtschaftlich) zusammengefasst. Gesetzt den Fall, die Ergebnisse der Bewertungsmethoden haben die gleiche Einheit, können diese auch ohne Skalierung verrechnet werden.

$$W_T(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (g_n \cdot W_{T,n})$$

$$W_W(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (g_n \cdot W_{W,n})$$

$$W_{\text{Ö}}(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n (g_n \cdot W_{\text{Ö},n})$$

Auf Basis der berechneten Wertigkeiten ist eine anschließende Auswahl von Kombinationen alternativer Lösungen mithilfe des integrierten morphologischen Kastens (siehe Kapitel 6.3) möglich. Aufgrund der Komplexität empfiehlt sich bei der Berechnung der Wertigkeiten und der anschließenden Auswahl eine Unterstützung durch geeigneten Softwareeinsatz (siehe Kapitel 6.4). Die in dem Schema dargestellten Verbindungspfeile stellen die Hauptverbindungen dar, trotzdem können auch weitere Verbindungen möglich sein. Die in der integrierten Bewertung eingesetzten Bewertungsmethoden sollen keinesfalls die Bewertungen innerhalb der Fachbereiche ersetzen, sondern lediglich ergänzen. Außerdem ist teilweise auch eine Überschneidung mit dem Einsatz der Methoden in den Fachbereichen möglich.

6.2.2 Integrierte Konzeptdefinition

Wie in Kapitel 5 aufgezeigt, werden Produkt, Produktions- und Materiallösungen oft isoliert oder bestenfalls in gegenseitiger Abstimmung in den jeweiligen Fachbereichen ausgewählt.

In der integrierten Konzeptdefinition (siehe Abbildung 55) werden die in der Konzeptphase der beteiligten Fachbereiche generierten alternativen Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen hingegen übergreifend bewertet und anschließend eingegrenzt bzw. ausgewählt. Die Verwendung von Lösungsmengen bietet eine höhere Flexibilität aufgrund von Änderungen, ermöglicht zudem verzögerte Entscheidungen, kann die Unsicherheiten bei der Lösungsbewertung in frühen Phasen adressieren und verbessert durch die anschließende Bewertung und Auswahl die Ergebnisse der Phase.

Ausgehend von den Produktanforderungen lassen sich Funktionen ableiten, die das Produkt erfüllen muss. Die Beschreibung soll möglichst lösungsneutral erfolgen, um den Lösungsraum so groß wie möglich aufzuspannen.

Die Realisierung der Produktfunktionen setzt entsprechende Wirkprinzipien bzw. eine Kombination mehrerer Wirkprinzipien voraus. Wirkprinzipien setzen sich aus physikalischen Effekten, stofflichen Merkmalen und einer groben Geometrie zusammen [PBFG06]. Bei der Suche nach geeigneten Wirkprinzipien können beispielsweise Kataloge oder auch der TRIZ-Ansatz verwendet werden.

Basierend auf der groben Geometrie und den stofflichen Merkmalen der potenziellen Wirkprinzipien [PBFG06] ist es möglich, die zur maßgeblichen Herstellung erforderlichen Produktionsfunktionen und notwendige Materialeigenschaften abzuleiten.

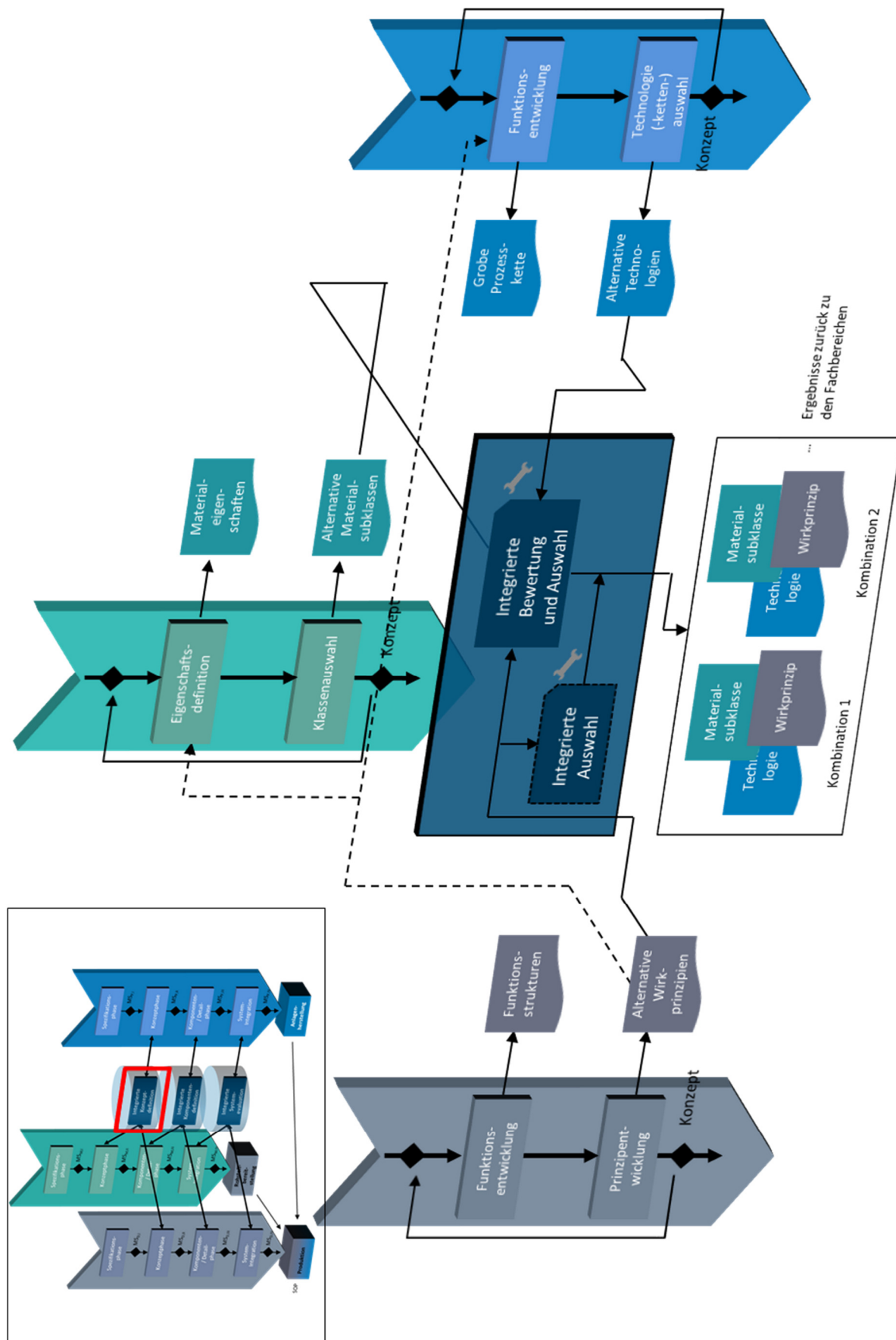


Abbildung 55: Integrierte Konzeptdefinition

Mithilfe von Datenbanken oder beispielsweise der DIN 8580 [DIN8580] kann die Suche nach Technologien erfolgen, die die geforderten Produktionsfunktionen erfüllen. Die Auswahl geeigneter Materialsubklassen mit entsprechenden Eigenschaften kann beispielsweise mit Software-Tools wie der CES-Software [Gran15] durchgeführt werden. Die Einschränkung der Materialklasse hätte in diesem Fall zu wenig Aussagekraft, da die Eigenschaften innerhalb der Klasse zu stark streuen.

Die Menge der generierten alternativen Kombinationen aus Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen wird anschließend, wie in Abbildung 55 dargestellt, in einem übergreifenden Bewertungs- und Auswahlschritt eingegrenzt. Die Bewertung erfolgt mehrdimensional, das heißt sie berücksichtigt ökologische, technische und wirtschaftliche Kriterien, um eine einseitig orientierte Auswahl zu verhindern.

Die gerade beschriebenen Tätigkeiten sind für den Fall gedacht, dass die Bewertung der Kombinationen erst durchgeführt werden muss, bevor anhand der Ergebnisse eine Eingrenzung der Lösungsmenge vorgenommen werden kann. Um den Entwicklungsprozess effizienter zu gestalten, ist es ebenfalls möglich, mit einer Datenbank zu arbeiten, die die Bewertung von verschiedenen Wirkprinzip-Technologie-Materialsubklasse-Kombinationen enthält. Der Prozess kann in diesem Fall durch eine direkte Auswahl der Kombinationen, ausgehend von den Wirkprinzipien, abgekürzt werden. Das Ergebnis der integrierten Konzeptdefinition sind alternative Kombinationen aus Wirkprinzip, Technologie und Materialsubklasse, die im Anschluss weiter eingegrenzt werden.

Mit der integrierten Bewertung und Auswahl bzw. der integrierten Auswahl erfolgt schließlich die Eingrenzung möglicher alternativer Lösungskombinationen. Die Struktur dieser Bewertung ist in Abbildung 56 dargestellt und lehnt sich an das Schema aus Abbildung 54 an. Die hier verwendeten Bewertungsmethoden eignen sich besonders für einen effizienten Einsatz in frühen Phasen, da die Kennwerte mittels Datenbanken abrufbar sind. Außerdem werden dadurch die verschiedenen Arten der Ressourcen aus Kapitel 2 adressiert. Dennoch ist auch der Einsatz anderer Bewertungsmethoden möglich, sofern die notwendigen Daten zugänglich sind.

Die technische Wertigkeit einer Kombination wird in Abbildung 56 beispielsweise aus der technischen Wertigkeit des Wirkprinzips und der technischen Wertigkeit der Technologie in Abhängigkeit des Materials sowie des Wirkprinzips bestimmt. Durch die stofflichen Merkmale von Wirkprinzipien wird die technische Wertigkeit des Wirkprinzips in der Nutzungsphase auch vom verknüpften Material beeinflusst. In diesem Wert ist beispielsweise die Eignung bzw.

Leistung eines Materials hinsichtlich der erforderlichen Werkstoffeigenschaften (z.B. mechanische Eigenschaften, Dichte usw.), die für ein Wirkprinzip benötigt werden, qualitativ berücksichtigt. Die Bewertung kann z.B. anhand des Bewertungsschemas der Nutzwertanalyse erfolgen, d.h. es werden den technischen Eigenschaften, wie bsplw. dem Wirkungsgrad, Werte von 0 (nicht möglich) bis 10 (sehr gut) zugeordnet. Die technische Wertigkeit der Technologie bezieht sich auf die Herstellung, hängt ebenfalls vom Material ab und kann beispielsweise anhand der herstellbaren Toleranzen oder Oberflächeneigenschaften (ebenfalls mit [Gran15] möglich) bewertet und normiert werden.

Die wirtschaftliche Wertigkeit einer potenziellen Kombination von Wirkprinzip, Technologie und Material setzt sich in Abbildung 56 aus den Material- und Verfahrenskosten zusammen. Zahlen für die Kosten können beispielsweise aus Datenbanken, wie sie in der CES-Software [Gran15] enthalten sind, bezogen werden. In der Rohstoffförderungs- und Herstellungsphase werden die Kosten nur durch das Material und den Herstellungsprozess beeinflusst. Eine Abschätzung der Kosten während der Nutzungsphase auf Konzeptebene ist hingegen schwierig, während es möglich ist, die Kosten für die Entsorgung der Materialien zusätzlich zu berücksichtigen.

Die ökologische Wertigkeit einer potentiellen Kombination setzt sich in Abbildung 56 beispielhaft aus den Ergebnissen der folgenden Bewertungsmethoden zusammen:

- Kumulierter Energieaufwand für die Bereitstellung und Entsorgung des Materials
- Material-Intensität Pro Serviceeinheit (MIPS)
- Ressourcenkritikalitätsanalyse des Materials
- CO₂-Bilanz für die Bereitstellung und Entsorgung
- Kumulierter Energieaufwand für die Fertigungstechnologie
- CO₂-Bilanz der Fertigungstechnologie
- Qualitative Bewertung des Wirkprinzips
- Alternativ: Kurzbilanz

Der Energieaufwand für die Bereitstellung und Entsorgung des Materials und für die Fertigungstechnologie sowie die gemittelte Ressourcenkritikalität des Materials und die CO₂-Bilanz lassen sich z.B. mit dem CES EduPack [Gran15] ermitteln. Mithilfe von Tabellen wie [Wupp14] können die Werte für die Material-Intensität bestimmt werden.

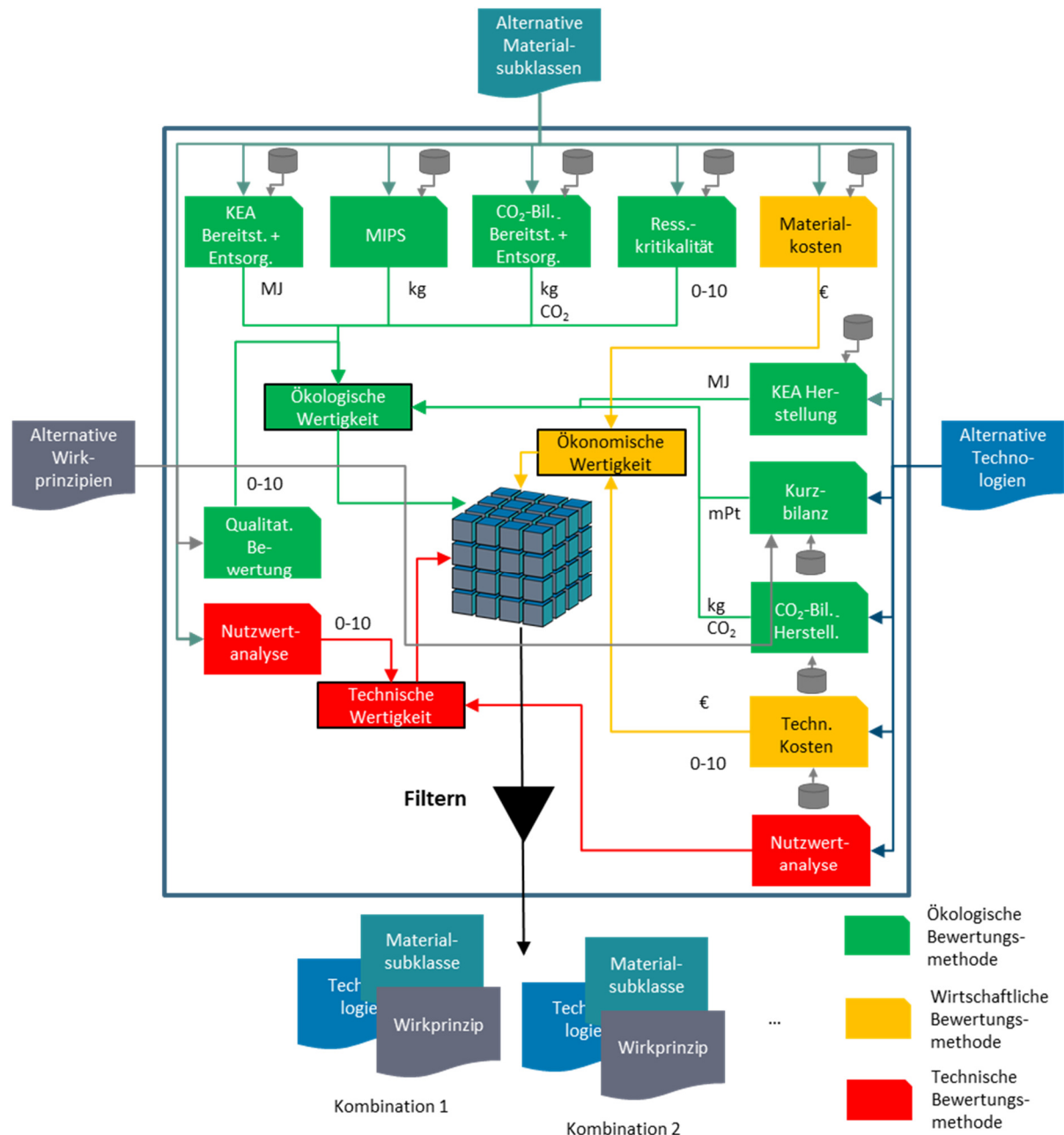


Abbildung 56: Integrierte Bewertung und Auswahl von Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen

Eine schadensorientierte Kurzbilanz einer Kombination ist beispielsweise mit einer Ökobilanz möglich, jedoch nur effizient durchführbar, wenn Bilanzen vordefinierter Technologien und Materialien hinterlegt sind. Die Ergebnisse (z.B. MJ, kg, mPt) werden normiert (0-10) und gewichtet miteinander verrechnet. Das Ergebnis ist ein Wert für die ökologische Wertigkeit einer Kombination von Wirkprinzip, Technologie und Material, die zwischen 0 und 10 liegt. Je nach Produktfunktion und der daraus resultierenden alternativen Wirkprinzipien kann auch eine Abschätzung der späteren ökologischen Auswirkungen der Wirkprinzipien während der Nutzungsphase vorgenommen werden. Eine solche Bewertung ist zu diesem Zeitpunkt jedoch

nur qualitativ durchführbar. Alternativ könnte die Bewertung bei der technischen Wertigkeit mitberücksichtigt werden. Ein niedriger Energieverbrauch ist heutzutage ohnehin eine gewünschte technische Eigenschaft. Für die Funktion Drehmomentübertragung wäre beispielsweise eine vergleichende Bewertung des Wirkungsgrades eines Drehmomentwandler gegenüber dem eines Zahnradgetriebes möglich.

In der integrierten Bewertung und Auswahl werden in dieser Arbeit maßgeblich die potenziellen Fertigungstechnologien betrachtet. Aus den Wirkprinzipien lassen sich auch grobe Informationen für die Aufgaben der Montage ableiten. Die Zusammenführung mehrerer Wirkprinzipien ist entweder über Fügeprozesse oder auch über eine Integration verschiedener Wirkprinzipien in einer Produktkomponente möglich. Auf Montageaspekte wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher eingegangen.

6.2.3 Integrierte Komponentendefinition

Nachdem in den jeweiligen Fachbereichen die in der integrierten Konzeptdefinition entwickelten Wirkprinzipien zu prinzipiellen Lösungen kombiniert und die daraus resultierenden Technologieketten nach Fallböhmer [Fall00] (siehe Kapitel 4.5) vervollständigt wurden, erfolgt die weitere Konkretisierung. Der Ablauf der integrierten Komponentendefinition ist in Abbildung 57 dargestellt.

Für alle generierten prinzipiellen Lösungen werden in der Detailentwicklung (D3) mehrere alternative Produktkomponenten entwickelt. Die detaillierte Prozessentwicklung und Anlagenentwicklung (P3) verknüpft die zuvor ausgewählten Technologien mit verschiedenen alternativen Produktionsanlagen und den zugehörigen Prozessen. In der Spezifikationsphase (M3) werden die in der Konzeptphase festgelegten Materialsubklassen weiter detailliert und schließlich mehrere alternative Materialien exakt spezifiziert. Die in der integrierten Konzeptdefinition erarbeiteten Kombinationen zwischen den Lösungen der drei Fachbereiche bleiben dabei bestehen.

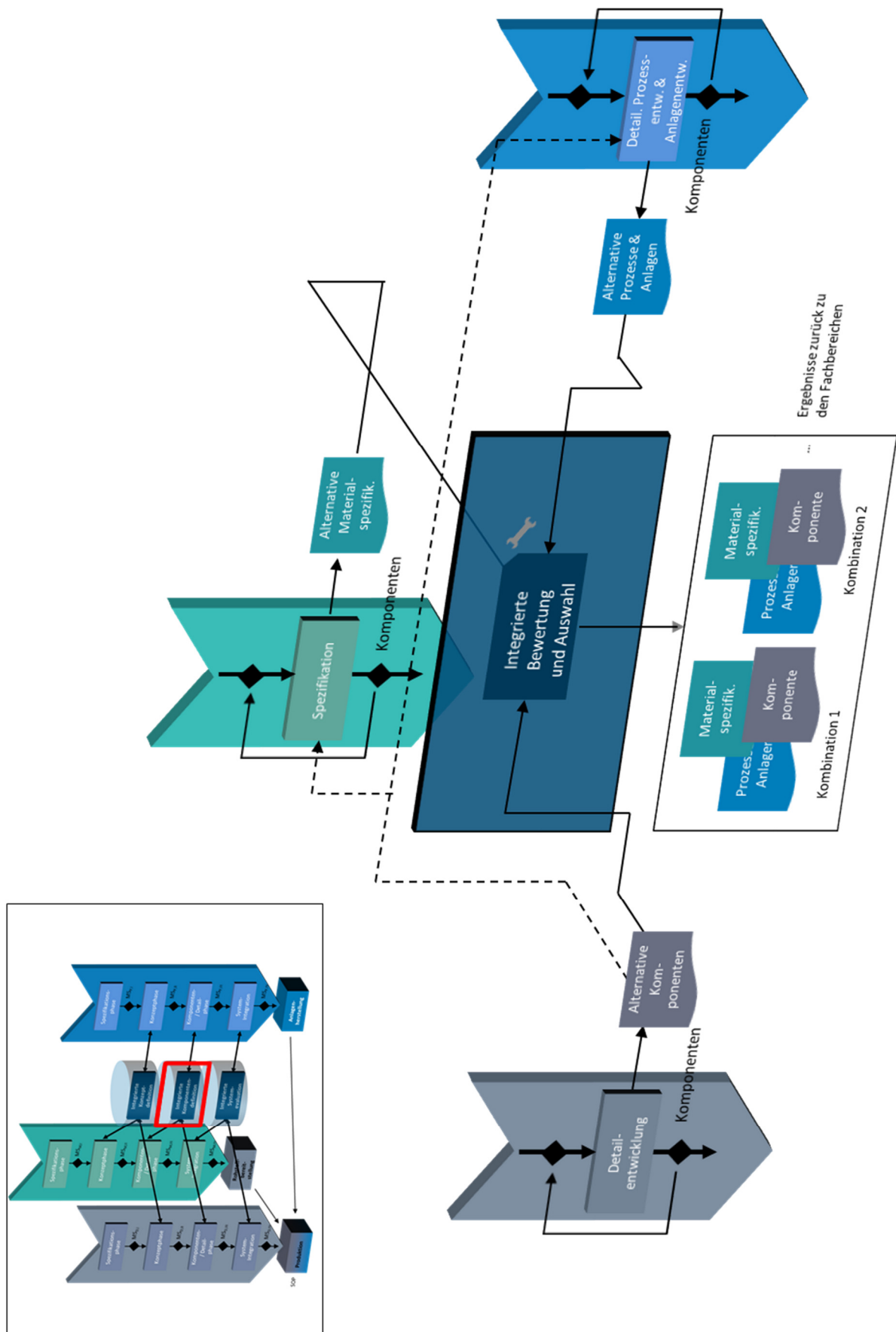


Abbildung 57: Integrierte Komponentendefinition

Die alternativen Kombinationen von Produktkomponenten, Anlagen und Prozessen sowie Materialien werden im Anschluss in der integrierten Komponentendefinition übergreifend bewertet und eingegrenzt. Aus diesen Lösungsmengen sollen schließlich die besten Kombinationen identifiziert werden. Dazu erfolgt eine übergreifende Bewertung mit anschließender Auswahl bzw. Eingrenzung, wie in Abbildung 58 dargestellt.

Die ausgewählten Produktkomponenten und detaillierten Anlagen und spezifizierten Prozessen sowie detaillierten Materialspezifikationen stellen schließlich das Ergebnis dieser Phase dar.

Die in Abbildung 58 gezeigte übergreifende Bewertung von alternativen Kombinationen aus Produktkomponenten, Anlagen und Prozessen zur Herstellung, sowie Materialien basiert ebenfalls auf dem in Abbildung 54 vorgestellten Bewertungsschema. Die aufgeführten Bewertungsmethoden sind für einen effizienten Einsatz gedacht und stellen dabei lediglich eine Auswahl an möglichen Methoden dar. Je nach Szenario ist es möglich auch andere Alternativen zu verwenden.

Die technische Wertigkeit einer potenziellen Kombination setzt sich aus der technischen Wertigkeit der Produktkomponenten in Verbindung mit der Materialspezifikation und der technischen Wertigkeit der Anlage in Verbindung mit der Materialspezifikation und der Produktkomponente zusammen. Die Ermittlung der technischen Wertigkeit der Produktkomponenten in Kombination mit den Materialien kann beispielsweise über eine Nutzwertanalyse oder durch fachbereichsspezifische Simulationsmethoden, wie z.B. einer FEM-Simulation oder CFD-Simulation, erfolgen, deren Ergebnisse bezüglich einer Zielgröße oder Anforderung auf die Bewertungsskala der Nutzwertanalyse normiert werden. Auf die fachbereichsspezifischen Simulationsmethoden wird an dieser Stelle jedoch nicht genauer eingegangen. Sie beschreiben lediglich eine Möglichkeit zur Ermittlung der technischen Wertigkeit. Die Bewertung der technischen Wertigkeit der Anlagen und Prozesse kann mithilfe von Simulationsmethoden der Digitalen Fabrik (z.B. NC-Simulation) erfolgen. Zur weiteren Verarbeitung der Ergebnisse ist eine Skalierung auf die Bewertungsskala von 0-10 und eine Gewichtung der Anteile erforderlich.

Die wirtschaftliche Wertigkeit setzt sich beispielsweise aus den Materialkosten und den über Investitionsrechnungen veranschlagten Kosten für die Anlagen zusammen. Für eine umfassende wirtschaftliche Bewertung ist allerdings eine vollständige Lebenszykluskostenrechnung aller Kombinationen aus Produktkomponenten, Anlagen und Materialien notwendig. Die Ergebnisse werden für die darauf aufbauende übergreifende Bewertung ebenfalls auf die Bewertungsskala von 0-10 normiert.

Die ökologische Wertigkeit wird in der in Abbildung 58 dargestellten Bewertung beispielsweise durch entsprechende Bewertungsmethoden wie in Kapitel 6.2.2 berechnet.

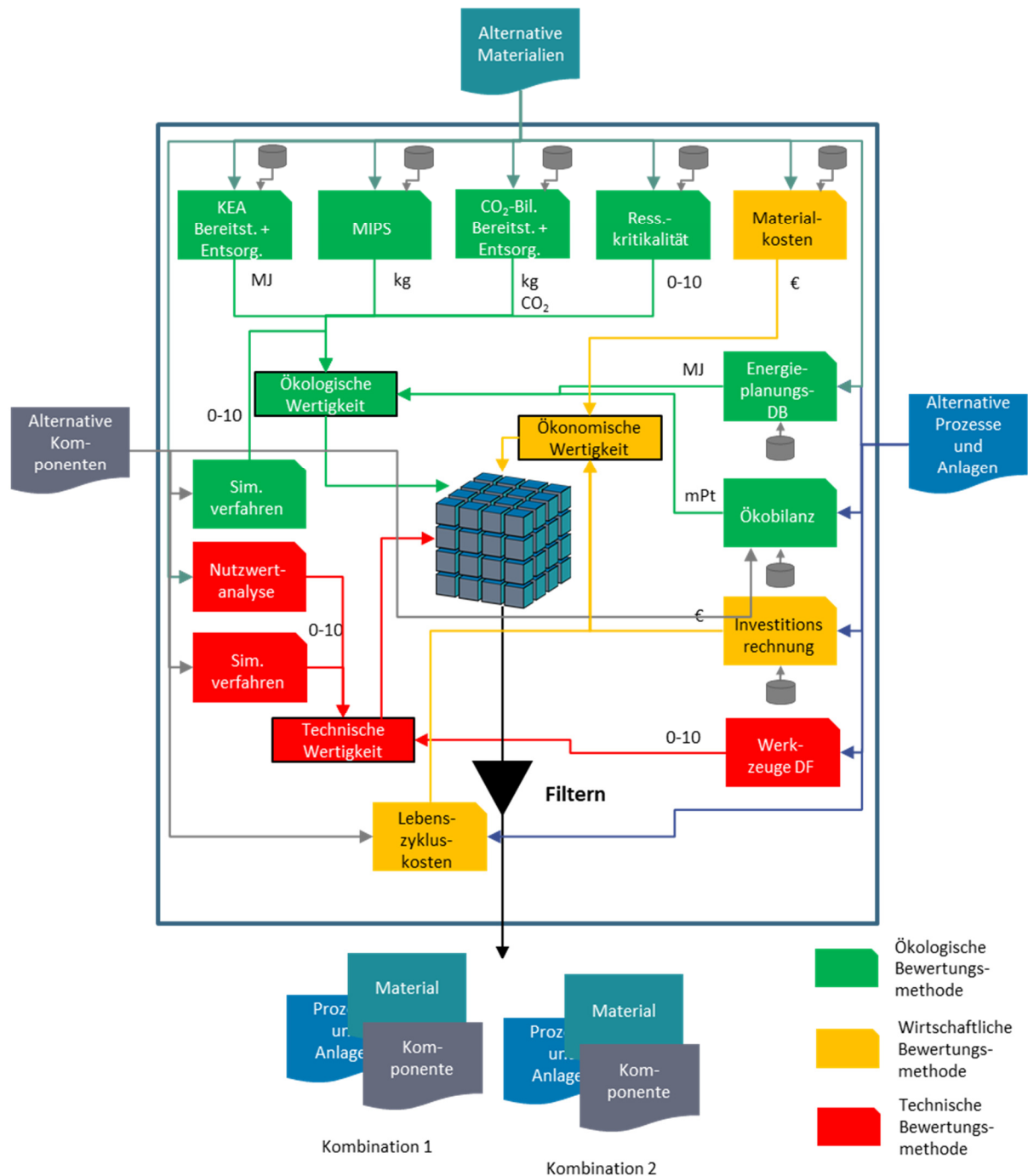


Abbildung 58: Integrierte Bewertung und Auswahl von Komponenten, Anlagen und Materialien

Zur vollumfassenden Bewertung der Umweltauswirkungen bietet sich in der integrierten Bewertung auch die Ökobilanz (z.B. mit GaBi [www8]) an, die eine Sachbilanz und schadensorientierte Ergebnisse liefert. Diese Methode verlangt jedoch eine vollständige Modellierung des Lebenszyklus mit entsprechenden Eingangsdaten und ist dadurch sehr aufwendig. Der Energieaufwand für

die Bereitstellung des Materials und für die Fertigungstechnologie sowie die Ressourcenkritikalität der Materialsubklasse lassen sich beispielsweise mit dem CES EduPack [Gran15] ermitteln. Mithilfe von Tabellen wie [Wupp14] können z.B. die Werte für die Materialintensität bestimmt werden. Die Beschaffung von Energiedaten der potenziellen Anlagen kann beispielsweise über Energieplanungsdatenbanken, basierend auf Messwerten, wie sie Swat [Swat15] entwickelt hat, von Vorgängeranlagen oder anhand von geeigneten Simulationen durchgeführt werden. Auf Basis der benötigten Energiemengen lässt sich außerdem die durch die eingesetzten Energiearten verursachten CO₂-Emissionen ausrechnen. Andere Treibhausgase lassen sich auf diese Weise leider nicht ermitteln. Es besteht allerdings die Möglichkeit auf die Werte für die Technologien zurückzugreifen.

Die Umwelteigenschaften der Anlagen während der Nutzungsphase können mithilfe fachbereichsspezifischer Simulationsverfahren bestimmt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Beschaffung von ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Daten verschiedener Komponenten des Produktionssystems, könnten Datenbanken wie die ecl@ss-Datenbank [www11] bieten. Dort ist es möglich Zugang zu Daten für verschiedene Produktdatenstandards (zukaufbare Komponenten in diesem Fall) zu erhalten. Die Datenbank müsste um die benötigten ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Daten ergänzt werden.

Mithilfe der eingesetzten Bewertungsmethoden ist es schließlich möglich, die alternativen Produktkomponenten, Anlagen mit den Prozessen sowie Materialien miteinander bezüglich der ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kriterien zu vergleichen und die besten Lösungen auszuwählen.

6.2.4 Integrierte Systemevaluation

Die in der vorangegangenen Phase ausgewählten Komponenten und Materialien werden in den jeweiligen Fachbereichen zu einem Gesamtsystem integriert. Dort wird überprüft, ob die fachbereichsspezifischen Anforderungen erfüllt werden und die Systeme zusammenpassen. Da jedoch das Produkt, die Anlagen und die Materialien sehr stark miteinander verflochten sind, ist eine zusätzliche, übergreifende Überprüfung des Zusammenspiels der Ergebnisse der drei Fachbereiche wünschenswert.

Aus diesem Grund wurde die in Abbildung 59 dargestellte integrierte Systemevaluation eingeführt.

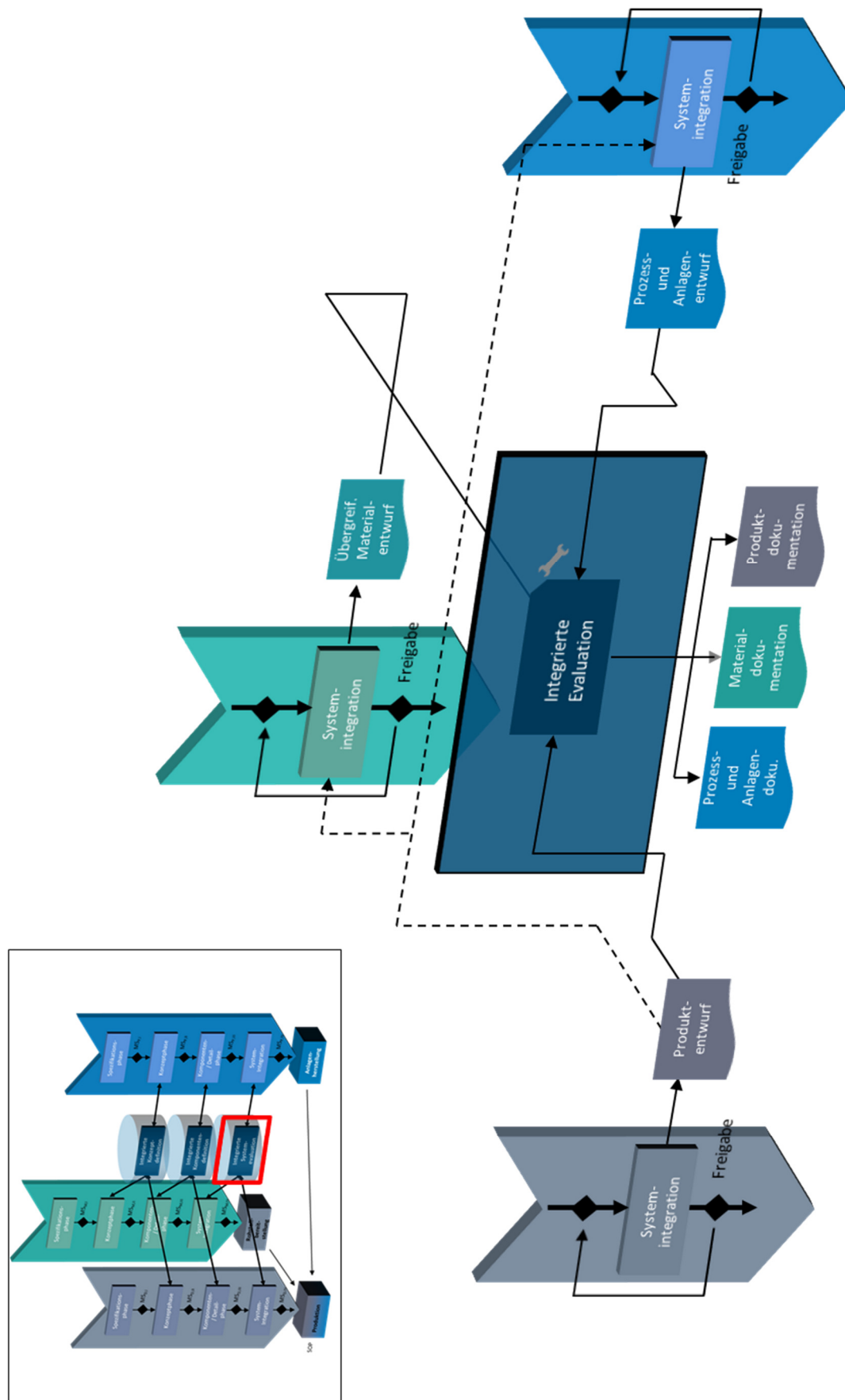


Abbildung 59: Integrierte Systemevaluierung

Hier werden nochmals die ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kennwerte des Produktes in Verbindung mit den zur Herstellung erforderlichen Anlagen und dem eingesetzten Material überprüft. Die während dieses Vorgangs generierten Kennwerte und Ergebnisse lassen sich zusätzlich in der Produktdokumentation verwenden. Während der Evaluation (siehe Abbildung 60) wird z.B. eine detaillierte Ökobilanzstudie durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt sollten alle konkreten Daten der Entwicklungsergebnisse vorliegen, weshalb das Ergebnis sehr präzise Aussagen über die Umweltauswirkungen zulässt. Auf Basis dieser Daten lässt sich beispielsweise auch eine Umwelterklärung ausarbeiten. Zugleich können die Ergebnisse als Referenzwert für nachfolgende Entwicklungen verwendet werden. Das Gleiche gilt für die wirtschaftlichen Kennwerte. Durch die fortgeschrittene Entwicklung stehen exakte wirtschaftliche Daten für eine Berechnung der Lebenszykluskosten bereit. Zur abschließenden technischen Evaluation der Ergebnisse können z.B. verschiedene Simulationsmethoden aus dem Bereich der Digitalen Fabrik eingesetzt werden. Dadurch ist es möglich die Herstellungsprozesse zu evaluieren.

Die so generierten Informationen und Ergebnisse werden in den Fachbereichen um weitere Daten zur finalen Dokumentation ergänzt.

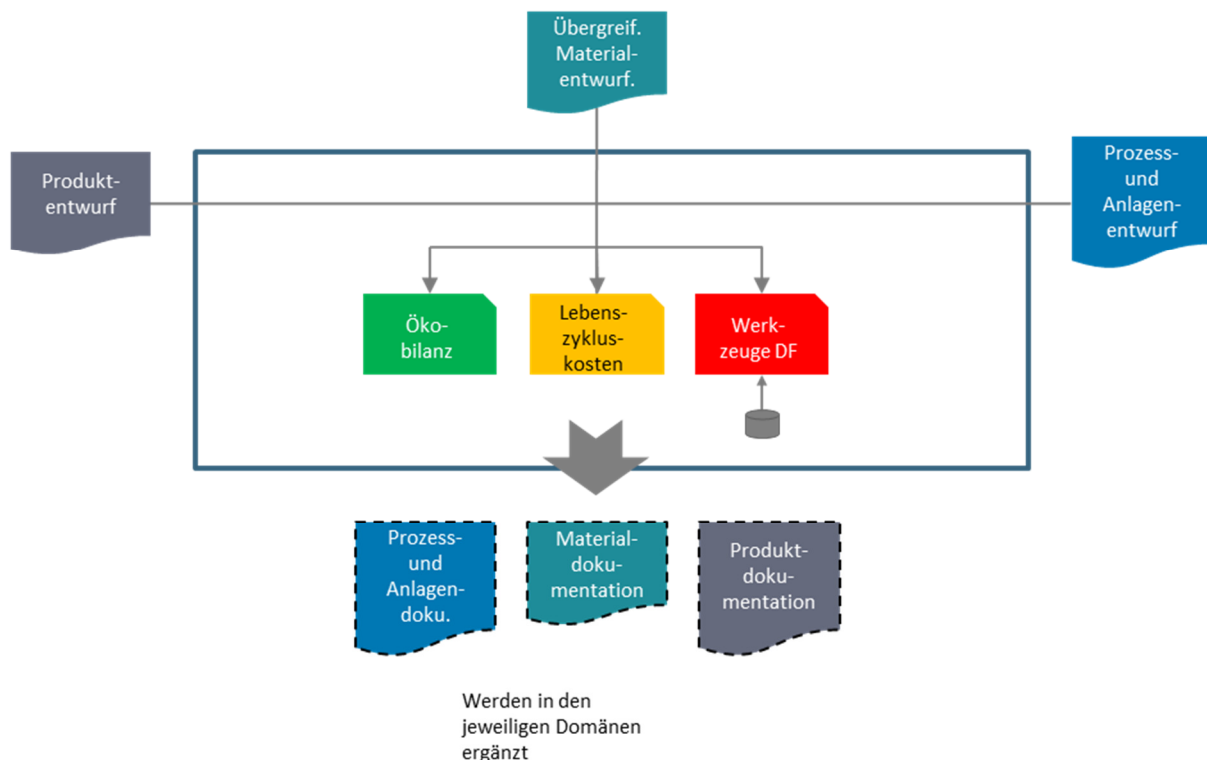


Abbildung 60: Integrierte Evaluation

6.2.5 Übersicht der Lösungsentwicklung

In diesem Kapitel wird nochmal kurz auf die verschiedenen Stufen bei der Lösungsentwicklung eingegangen und erklärt, welche Schritte in den jeweiligen Fachbereichen und welche Schritte in den integrierten Definitionsphasen erfolgen. Abbildung 61 zeigt den Ablauf bei der Erarbeitung der Lösungen für das Produkt, Produktionssystem und Material.

Für die in der Produktdefinition entwickelten Wirkprinzipien werden in der Produktionsdefinition Fertigungstechnologien und in der Materialdefinition Materialsubklassen aufgestellt. In der integrierten Konzeptdefinition erfolgt mithilfe von ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Bewertungsmethoden in Verbindung mit dem integrierten morphologischen Kasten eine Eingrenzung auf die besten Kombinationen von Wirkprinzip, Technologie und Materialsubklassen. Im Anschluss kombiniert die Produktdefinition die potenziellen Wirkprinzipien zu alternativen prinzipiellen Lösungen, während die Produktionsdefinition alternative Technologieketten aus den verknüpften Technologien erstellt.

In der Materialdefinition werden falls möglich Materialsubklassen innerhalb der Zuordnung zu den Wirkprinzipien zusammengefasst. Die Produkt-, Produktions- und Materialkonzepte sind damit vollständig.

In den jeweiligen Fachbereichen werden im Anschluss die zuvor erstellten Konzepte ausgearbeitet. Die Produktdefinition entwickelt für die Konzepte alternative Komponenten, während die Produktionsdefinition den Technologieketten alternative Produktionsprozesse und -komponenten (Anlagen) zuordnet. In der Materialdefinition müssen innerhalb der Materialsubklassen geeignete Materialien gesucht werden.

Um das bestmögliche Ergebnis zu erhalten, werden die generierten Alternativen in der integrierten Komponentendefinition mithilfe des integrierten morphologischen Kastens übergreifend bewertet und die beste Lösung ausgewählt. Damit sind die Komponenten, Prozesse und Anlagen sowie die Materialien exakt spezifiziert.

Im Anschluss erfolgt die abschließende Gesamtevaluation, in der das Zusammenspiel überprüft sowie die Kosten und Umweltauswirkungen detailliert ermittelt und mit den Anforderungen verglichen werden. Mit dieser Spezifizierung kann die Herstellung der Produktionsanlagen beginnen. Sobald die Anlagen in der Fabrik aufgebaut sind, erfolgt die Inbetriebnahme dieser. Mit erfolgreichem Abschluss kann schließlich der Start-of-Production (SOP) beginnen.

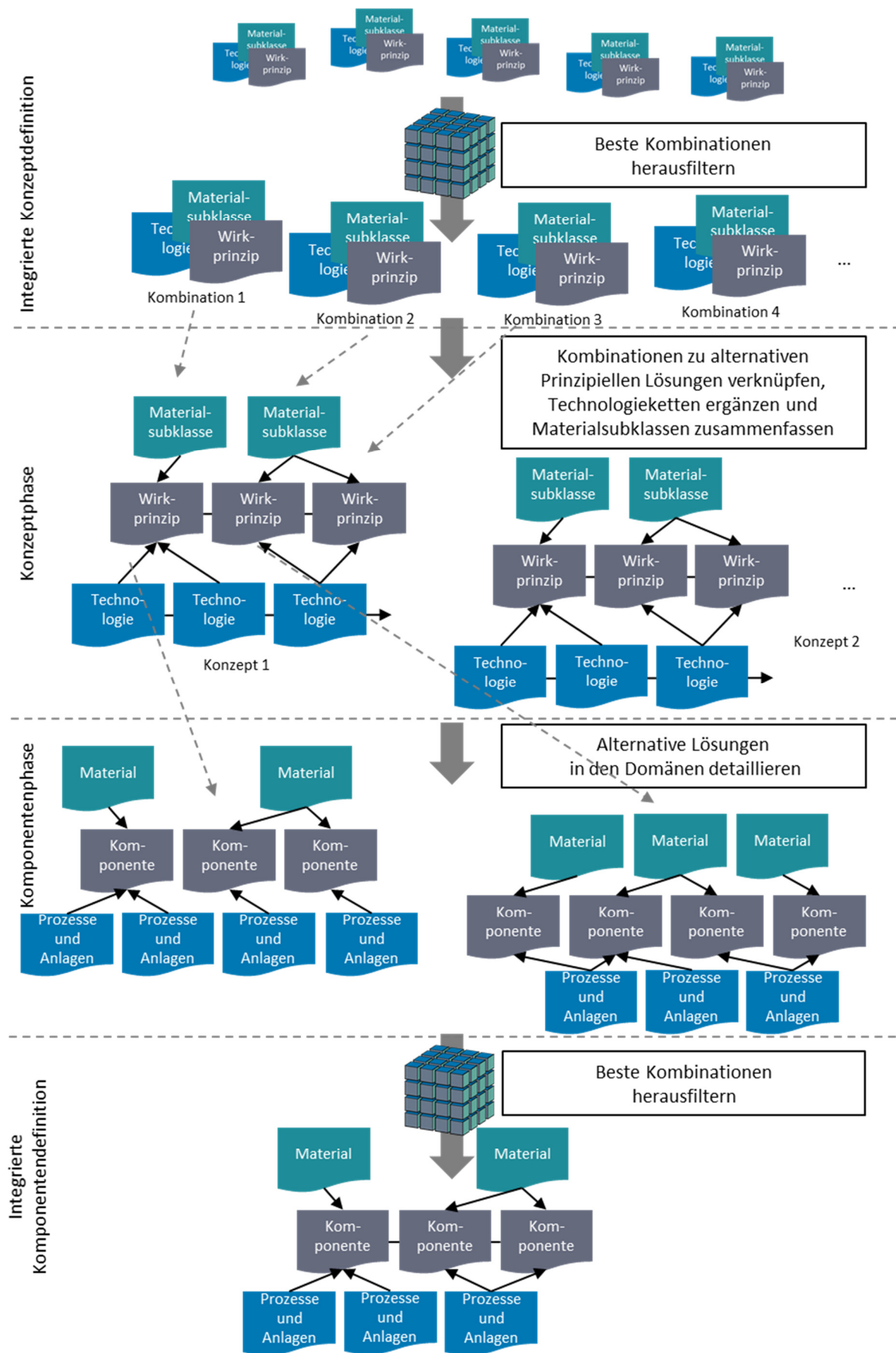


Abbildung 61: Übersicht der Lösungsentwicklung

6.3 Integrierte Bewertungs- und Auswahlmethode

Während der Analyse des Stands der Technik wurden Defizite bei der übergreifenden Auswahl und Bewertung von potenziellen Produkt-, Produktions- und Materiallösungen aufgedeckt. Die Bewertung von Lösungsalternativen wird bei vielen Ansätzen nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt und erfolgt nicht integriert sowie oft nur nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien.

In einem integrierten Prozess ist jedoch genau dieser Schritt ein zentraler Punkt, der erforderlich ist, um ganzheitliche ressourceneffiziente Produkte zu realisieren. Aus diesem Grund wurde der integrierte morphologische Kasten entwickelt. Mithilfe dieser Methode ist eine übergreifende Bewertung und Auswahl von Lösungen in den in Kapitel 6.2 vorgestellten integrierten Definitionsphasen realisierbar.

Die Methode ist an den klassischen morphologischen Kasten nach [Zwic89] angelehnt, wie er in [PBF06] beschrieben wird. Anstatt jedoch nur die Produktteillösungen auszuwählen und zu einem Konzept zu kombinieren, werden entsprechende Produktions- und Materiallösungen in die Auswahl integriert. Die Methode wurde erstmals in [StVi15] vorgestellt worden. Weitere Vorüberlegungen zu dem Prozessmodell sind in [SKBV17a] und [StVi16b] veröffentlicht.

Die Auswahl basiert auf einer ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Bewertung. Werte für die drei Kriterien werden, wie in Kapitel 6.2.2 und 6.2.3 beschrieben, mithilfe bereits etablierter und anerkannter Bewertungsmethoden ermittelt. Der Einsatz im operativen Umfeld setzt dabei eine effiziente und effektive Beschaffung und Verrechnung der Daten voraus, weshalb beispielsweise die in Kapitel 6.2 verwendeten Methoden eingesetzt werden.

Durch die hohe Komplexität aufgrund der drei Bewertungskriterien in Verbindung mit den drei potenziellen Lösungsmengen für Produkt, Produktion und Material entsteht die in Abbildung 62 gezeigte dreidimensionale Struktur (Würfel) des morphologischen Kastens in Kombination mit der dreidimensionalen Bewertung. Der dargestellte übergeordnete Würfel repräsentiert alle möglichen Kombinationen aus Produkt-, Produktions-, und Materiallösung, die jedoch nicht alle sinnvoll sein müssen bzw. möglich sind. Eine nicht sinnvolle oder nicht mögliche Kombination wird einfach mit einer 0 bewertet. Die Lösungen sind dabei nach den hierarchisch übergeordneten Funktionen gegliedert, was in Abbildung 62 aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt, aber in Abbildung 64 (dreidimensionale Struktur auf zwei Dimensionen heruntergebrochen) erkennbar ist.

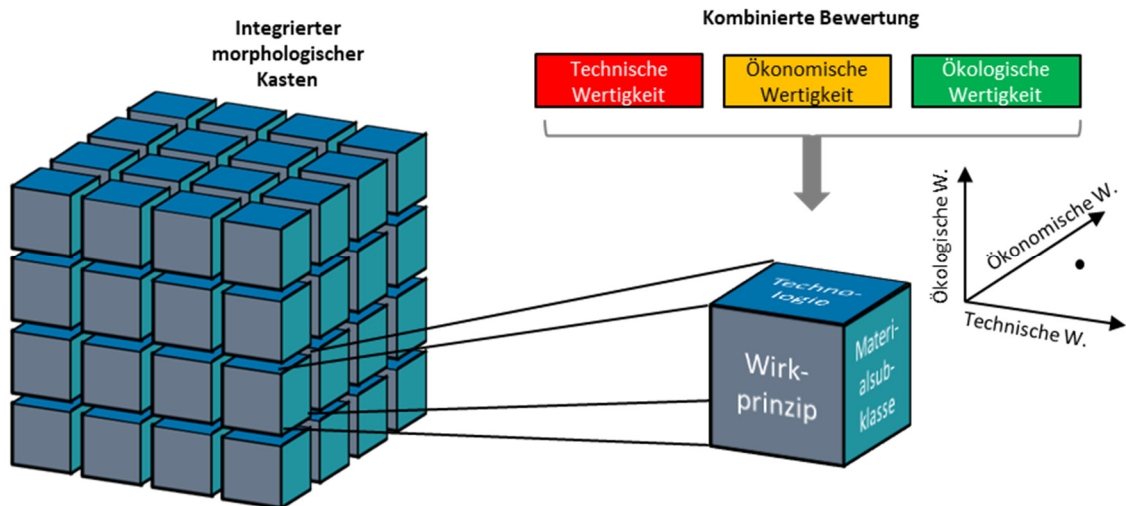


Abbildung 62: Struktur des integrierten morphologischen Kastens

Jeder Teilwürfel repräsentiert eine Kombination aus einer Produktlösung, einer Produktionssystemlösung und einer Materiallösung, welche jeweils auf den Seiten zu erkennen sind. In der integrierten Komponentendefinition steht der Oberbegriff *Lösung* beispielsweise für das Wirkprinzip, die Technologie bzw. die Materialsubklasse. In jedem Würfel ist ein Wert für die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit der Kombination hinterlegt.

Die Wertigkeiten werden zur besseren Übersichtlichkeit in einem Koordinatensystem, ähnlich dem Stärkediagramm der technisch-wirtschaftlichen Bewertung [VDI2225], angeordnet. Für eine erstmalige Aufstellung des morphologischen Kastens ist die Ermittlung aller Kennwerte erforderlich. Die Ergebnisse können anschließend für weitere Entwicklungsprojekte genutzt und weiter ergänzt werden.

Die in Abbildung 63 dargestellte Aufstellung beginnt in der Konzeptphase mit der Suche nach alternativen Wirkprinzipien, die die Produktfunktionen erfüllen. Daraus können im Anschluss die erforderlichen Produktionsfunktionen und Materialeigenschaften abgeleitet werden. Es folgt die Suche nach alternativen Technologien und Materialsubklassen zur Erfüllung der Funktionen und Eigenschaften. Alle alternativen Lösungen für das Produkt, das Produktionssystem und das Material werden schließlich in den integrierten morphologischen Kasten eingetragen.

Die Lösungen der Komponentenphase können ebenfalls mit dem integrierten morphologischen Kasten bewertet und ausgewählt werden.

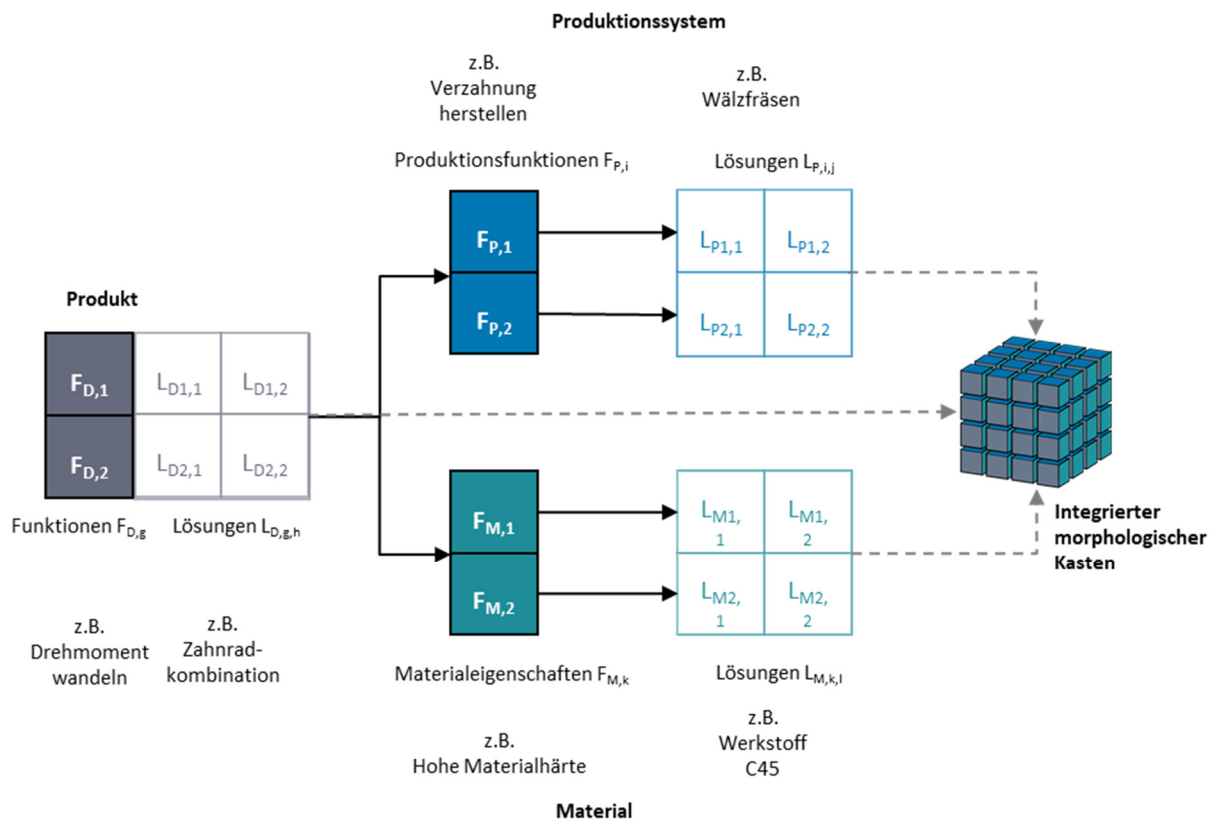


Abbildung 63: Aufstellung des integrierten morphologischen Kastens (in Anlehnung an [StVi16b])

Im Anschluss erfolgt die eigentliche Bewertung aller Kombinationen mithilfe des in Kapitel 6.2 beschriebenen Ablaufs. Die Wertigkeiten haben z.B. einen Bereich von 0 bis 10 Punkten, ähnlich der Nutzwertanalyse. Bei der wirtschaftlichen und ökologischen Wertigkeit besteht die Möglichkeit, konkrete Werte wie die Kosten (€) oder den Eco-indicator 99 (mPt) einzutragen, wenn jeweils nur Kriterien die miteinander vergleichbar sind ausgewählt wurden.

Je nach Szenario ist auch ein anderer Startpunkt für die Aufstellung möglich. Werden für ein bereits bestehendes Produktionssystem neue Produkte entwickelt, können aus den existierenden Produktionssystemlösungen die Produktionsfunktionen abgeleitet werden. Im Anschluss können Wirkprinzipien gesucht werden, die die Produktfunktion erfüllen und von den Produktionsfunktionen herstellbar sind.

Abbildung 64 zeigt die Struktur eines morphologischen Kastens bei Fixierung einer Dimension. Zur Visualisierung ist die Materialdimension fixiert. In der Tabelle werden die jeweiligen Werte für die ökologische Wertigkeit dargestellt.

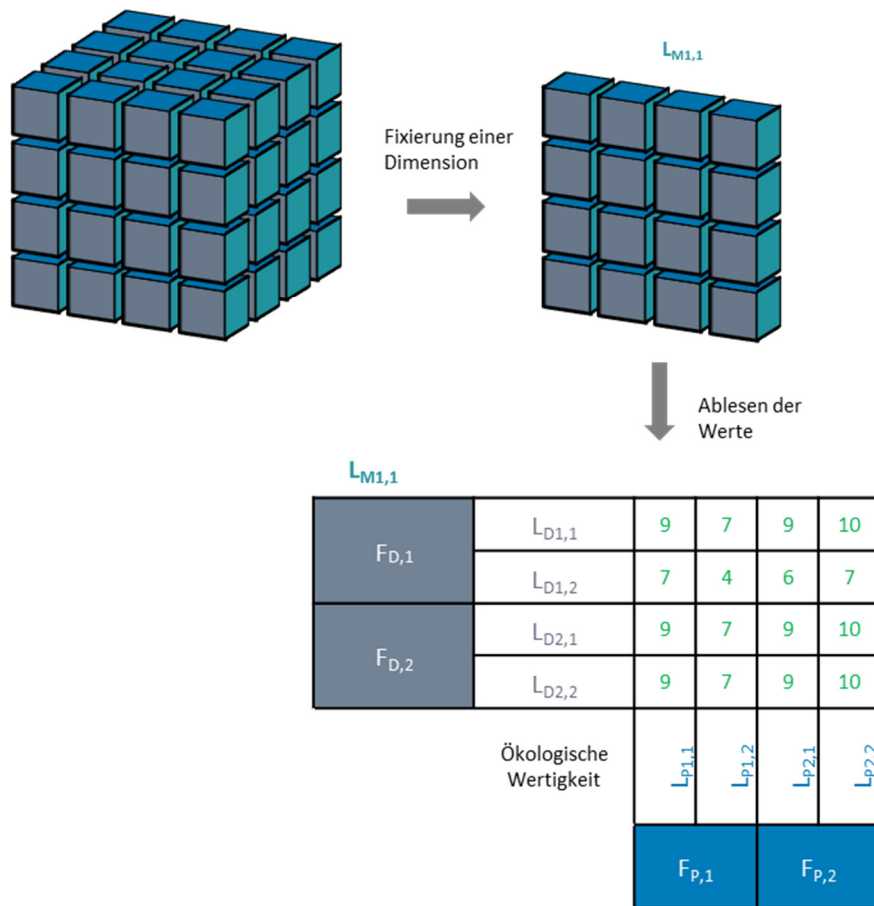


Abbildung 64: Fixierung einer Dimension des morphologischen Kastens

Bei der Bewertung der Kombinationen sind zwei besondere Fälle zu beachten. Ist eine Kombination nicht möglich, so wird die Wertigkeit auf 0 gesetzt. Ist eine Kombination nicht notwendig (z.B. eine Produktionsfunktion wird für ein Wirkprinzip im Gegensatz zum einem anderen Wirkprinzip nicht benötigt) wird die Wertigkeit größer dem Maximalwert 10 gesetzt. Auf diese Problematik wird bei der mathematischen Beschreibung in diesem Kapitel näher eingegangen.

Die Struktur des integrierten morphologischen Kastens kann auch in Matrixschreibweise dargestellt werden, wenn eine Dimension fixiert wird. Die Wertigkeiten $W_x(L_{D,g,h}; L_{P,i,j}; L_{M,k,l})$ (x = ökologisch, technisch, wirtschaftlich) der Kombinationen aus Produkt-, Produktions- und Materiallösung stellen die Einträge der Matrix dar.

Die Gesamtmatrix für den integrierten morphologischen Kasten (Materialdimension fixiert) lässt sich damit folgendermaßen aufstellen:

$$\begin{pmatrix}
 W_x(L_{D,1,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,1,1}; L_{P,1,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 W_x(L_{D,1,n}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,1,n}; L_{P,1,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & & \vdots \\
 W_x(L_{D,m,1}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,m,1}; L_{P,1,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 W_x(L_{D,m,n}; L_{P,1,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,m,n}; L_{P,1,q}; L_{M,1,1}) \\
 \\
 \dots & & \\
 W_x(L_{D,1,1}; L_{P,p,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,1,1}; L_{P,p,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 W_x(L_{D,1,n}; L_{P,p,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,1,n}; L_{P,p,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & & \vdots \\
 W_x(L_{D,m,1}; L_{P,p,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,m,1}; L_{P,p,q}; L_{M,1,1}) \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 W_x(L_{D,m,n}; L_{P,p,1}; L_{M,1,1}) & \cdots & W_x(L_{D,m,n}; L_{P,p,q}; L_{M,1,1})
 \end{pmatrix}$$

Die dritte Dimension (falls nicht fixiert) kann in dieser Form durch hintereinander angeordnete Matrizen dargestellt werden. Der Aufbau der Matrix wird im Folgenden erklärt.

Die Zeilen der Matrix beinhalten die Wertigkeiten $W_x(L_{D,g,h}; L_{P,i,j}; L_{M,k,l})$ für die Kombinationen einer Produktlösung mit den verschiedenen Produktionssystemlösungen (für $g=1$, $h=1$ und $i=1$ bis p , $j=1$ bis q). Alle Produktlösungen, die zu einer Produktfunktion gehören, sind untereinander angeordnet ($h=1$ bis n). In den Spalten stehen die Matrixeinträge für die Kombinationen einer Produktionssystemlösung mit den potenziellen Produktlösungen.

Sobald die Matrix mit den Bewertungsdaten gefüllt ist, besteht die Herausforderung darin, das beste Wirkprinzip zu einer Produktfunktion in Kombination mit der besten Technologie auszuwählen. Die Auswahl kann prinzipiell rechnerisch oder grafisch erfolgen.

Bei der rechnerischen Auswahl muss zunächst jeweils für jede Produktlösung einer Produktfunktion — also jede Zeile — die Summe der besten Produktionssystemlösungen ermittelt werden. Dazu werden in jeder Zeile innerhalb der Produktionsfunktionen die Lösungen mit der höchsten Wertigkeit rausgesucht. Die Summe der besten Lösungen pro Produktionsfunktion stellt den Gesamtwert dar. Anschließend wird für jede Produktfunktion die Produktlösung mit dem höchsten Gesamtwert ausgewählt. Das Verfahren zur Berechnung ist zur besseren Verständlichkeit in Abbildung 65 nochmals dargestellt.

$L_{M1,1}$		9 + 10				
$F_{D,1}$	$L_{D1,1}$	9	7	9	10	= 19
	$L_{D1,2}$	7	4	6	7	= 14
$F_{D,2}$	$L_{D2,1}$	9	7	9	10	
	$L_{D2,2}$	9	7	9	10	
		$L_{P1,1}$	$L_{P1,2}$	$L_{P2,1}$	$L_{P2,2}$	
		$F_{P,1}$		$F_{P,2}$		

Abbildung 65: Vorgehensweise bei der Lösungsauswahl innerhalb des integrierten morphologischen Kastens

Das Ergebnis der rechnerischen Auswahl sind die besten Produktlösungen zur Erfüllung der Produktfunktionen in Kombination mit den jeweils besten Produktionslösungen der zur Herstellung erforderlichen Produktionsfunktionen. Dieser Vorgang muss für die drei verschiedenen Wertigkeiten durchgeführt werden, was allerdings in drei voneinander unabhängigen Ergebnisse resultiert. Man würde eine Rangliste ökologisch guter, technisch guter und wirtschaftlich guter Lösungen erhalten. Dem Anwender obliegt es dann, welche Lösung er auswählt.

Um den Sachverhalt systematischer zu gestalten, werden die drei Wertigkeiten gewichtet aufsummiert und auf Basis dieser gewichteten Wertigkeit der zuvor beschriebene Berechnungsvorgang durchgeführt. Dadurch bleibt am Ende eine Rangliste der besten technisch-wirtschaftlich-ökologischen Kombinationen als Ergebnis. Allerdings muss bei der Gewichtung der drei Kriterien beachtet werden, dass sich diese mit den Gewichtungen innerhalb der Kriterien überlagern.

Die Materiallösungen können durch die Betrachtung der dritten Dimension in die Rechnung integriert werden. Die in der in Abbildung 65 dargestellten Werte der Matrix berücksichtigen jeweils die beste Materiallösung für die Kombination aus der Produkt- und Produktionssystemlösung.

Falls eine Produktionsfunktion für eine Produktlösung nicht erforderlich ist (z.B. Härte erhöhen bei Riemenscheibe), wird die Wertigkeit größer 10 gesetzt. Je nachdem, wie die Zusammensetzung der restlichen Daten ist, kann es an dieser Stelle bei der Bewertung zu leichten Abweichungen kommen. Je nachdem, wie hoch der Wert gesetzt ist, kann das „Nicht-Benötigen“ einer Produktionsfunktion zu gut oder zu schlecht bewertet werden. Das Arbeiten mit Lösungsmengen

(siehe Kapitel 4.1) kann dieses Problem kompensieren, da nicht nur die rein rechnerisch beste Lösung weiter betrachtet wird, sondern auch Lösungen, die in der Nähe liegen.

Da die Matrizen selbst für kleine Beispiele schnell sehr groß und komplex werden, wird der Einsatz des Integrierten Morphologischen Kastens durch ein eigens entwickeltes Software-Tool (siehe Kapitel 6.4) digital unterstützt.

Das graphische Verfahren basiert auf der gerade beschriebenen rechnerischen Auswahl. Im Gegensatz dazu wird die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit jedoch nicht gewichtet aufsummiert und weiterverarbeitet. Der Anwender entscheidet für jede Produktfunktion selbst, wie er die Gewichtung zwischen den drei Kriterien wählt. Die Auswahl erfolgt anhand eines dreidimensionalen Diagramms, einer Erweiterung des zweidimensionalen Stärkediagramm aus der VDI2225 [VDI2225]. Innerhalb des Auswahlfensters wird die aggregierte Bewertungspunktzahl angezeigt, damit in jeder Ebene die darunterliegenden Ergebnisse mitberücksichtigt werden. Bei der Auswahl zwischen alternativen Produktlösungen werden die Ergebnisse mit den jeweils besten Produktionssystemlösungen und Materialien angezeigt. Dadurch ist die Auswahl immer konsistent und es kann auch mit einer anderen Dimension begonnen werden.

Dieses Vorgehen ist flexibler und bezieht den Anwender und sein Wissen stärker in den Auswahlprozess mit ein. Ein operativer Einsatz der graphischen Auswahl setzt ebenfalls eine digitale Unterstützung voraus. An dieser Stelle könnten auch konkrete Werte, wie Kosten (€) oder der Eco-indicator 99 (mPt), in der graphischen Auswahl angezeigt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sich die Kriterien wiederum aus miteinander verrechenbaren Größen zusammensetzen.

Abbildung 66 zeigt den integrierten morphologischer Kasten für ein kleines Beispiel, ein einstufiges nicht-schaltbares Getriebe (das Beispiel wird in Kapitel 7.1 als Validierungsbeispiel weiter ausgeführt). Zum besseren Verständnis ist die dreidimensionale Struktur durch das Fixieren einer Dimension (Material) in einer zweidimensionalen Ansicht dargestellt.

Die Materialsubklasse wurde in Abbildung 66 auf unlegierte Stähle beschränkt. Die in diesem Beispiel betrachteten Funktionen sind „Drehmoment übertragen“ und „Drehmoment einleiten“. Die Funktion „Drehmoment übertragen“ kann beispielsweise durch eine Zahnradkombination oder einen hydraulischen Drehmomentwandler erfüllt werden. Mit den Wirkprinzipien Keilwelle oder Flansch ist es hingegen möglich, die Funktion „Drehmoment einleiten“ zu realisieren.

Unlegierter Stahl

Drehmoment übertragen	Zahnradkombination	10	8	9	10
	Drehmomentwandler	7	6	7	8
Drehmoment einleiten	Keilwelle	10	8	9	10
	Flansch	9	8	9	9
Ökologische Wertigkeit		Gießen	Pulvermetallurgie	Schleifen	Fräsen
		Form herstellen		Form ändern	

Unlegierter Stahl

Drehmoment übertragen	Zahnradkombination	9	9	0	0
	Drehmomentwandler	7	5	7	7
Drehmoment einleiten	Keilwelle	8	0	9	9
	Flansch	8	0	8	8
Technische Wertigkeit		Gießen	Pulvermetallurgie	Schleifen	Fräsen
		Form herstellen		Form ändern	

Unlegierter Stahl

Drehmoment übertragen	Zahnradkombination	6	6	9	9
	Drehmomentwandler	6	6	9	9
Drehmoment einleiten	Keilwelle	6	6	9	9
	Flansch	6	6	9	9
Wirtschaftliche Wertigkeit		Gießen	Pulvermetallurgie	Schleifen	Fräsen
		Form herstellen		Form ändern	

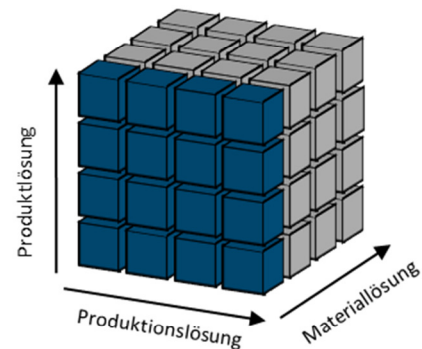


Abbildung 66: Beispiel für den integrierten morphologischen Kasten (basierend auf [StVi16b] und [SKBV17a])

Zur Herstellung wurden in diesem Beispiel die beiden Funktionen „Form herstellen“ und „Form ändern“ ausgewählt. Mit den Technologien Gießen oder Pulvermetallurgie lässt sich beispielsweise die Form herstellen. Die Technologien Schleifen und Fräsen ermöglichen hingegen eine Änderung der Form.

Für die daraus resultierenden Kombinationen wurde in Abbildung 66 eine ökologische, technische und wirtschaftliche Bewertung durchgeführt. Dabei fällt auf, dass aufgrund der Datenver-

arbeitung der einzelnen ökologischen Kriterien hin zu den Wertigkeiten die ökologische Wertigkeit auch für technisch nicht sinnvolle Kombinationen dargestellt ist. Dies ist in dem präsentierten Beispiel bei der Kombination Zahnrad und Fräsen der Fall. Zur Herstellung der Verzahnung müsste eine Technologie wie z.B. das Wälzfräsen verwendet werden, die aufgrund des begrenzten Umfangs des Beispiels an dieser Stelle nicht aufgeführt ist. Im Rahmen der technischen Wertigkeit wird dieser Sachverhalt jedoch adressiert. Hier wird einer nicht umsetzbaren Kombination eine 0 zugeordnet. Im späteren graphischen Auswahlverfahren werden diese Lösungskombinationen dann nicht mehr berücksichtigt.

Zur Vervollständigung der Methode ist die Bewertung der in Abbildung 66 dargestellte Kombinationen für alle geeigneten Materialsubklassen erforderlich. Die Verrechnung der Ergebnisse findet dann wie oben beschrieben statt. Im Anschluss können schließlich die besten Kombinationen automatisch berechnet oder graphisch ausgewählt werden.

6.4 Umsetzung eines Software-Prototyps

Die in Kapitel 6.3 vorgestellte Bewertungsmethode nimmt bei konkreten Entwicklungsaufgaben schnell eine sehr komplexe Struktur an. Aus diesem Grund wurde eine Softwarelösung entwickelt (erstmalig vorgestellt in [SKBV17b]), die den effizienten und effektiven Einsatz der Methode ermöglicht. Die Software berechnet nicht nur die optimalen Kombinationen, sondern bietet dem Anwender die Möglichkeit, mithilfe eines Auswahlbereichs die Lösungen anhand ihrer Wertigkeiten auszuwählen.

Die allgemeine Struktur der entwickelten Softwarelösung ist in Abbildung 67 dargestellt. Eine entsprechende Datenbank bildet die Basis für die Verarbeitung der Daten. Dort werden alle potenziellen Kombinationen mit ihren ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kennwerten gespeichert. Mit einer „Online Analytical Processing“-Lösung (OLAP) zur Datenanalyse werden die Daten aufbereitet und entsprechend der in Kapitel 6.3 vorgestellten Methode verarbeitet. Im User-Interface erfolgt schließlich die Visualisierung der Ergebnisse. Die Softwarelösung bietet zwei Möglichkeiten zur Lösungsauswahl.

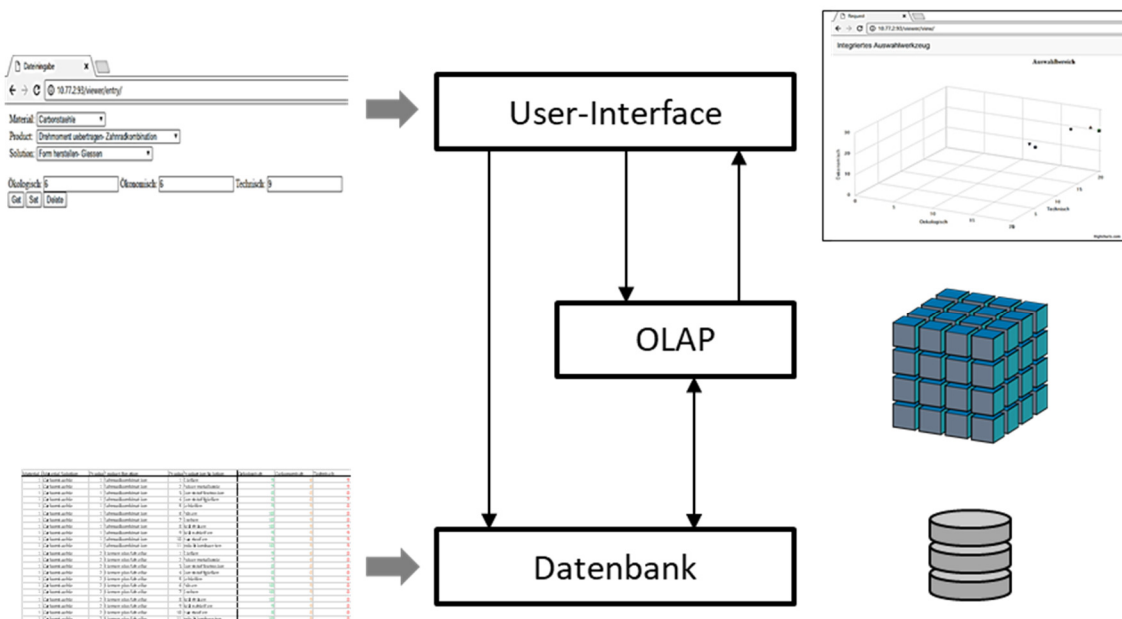


Abbildung 67: Struktur der Softwarelösung

Zu einem kann der Anwender in einem Auswahlfenster die Kombinationen anhand ihrer ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten manuell auswählen, d.h. er muss abwägen, welches Kriterium im jeweiligen Szenario höher gewichtet wird. Die zweite Möglichkeit ist die Übernahme der Kombination mit dem höchsten Wert, die dem Nutzer auf jeder Ebene automatisch angezeigt wird. Während die Auswahl der Kombinationen ausschließlich über das User-Interface erfolgt, gibt es bei der vorgelagerten Bewertung zwei Wege. Neue Datensätze können entweder über das User-Interface oder per Importfunktion in die Datenbank aufgenommen werden. Werden komplette Datensätze importiert, müssen diese bereits entsprechend vorformatiert sein. Beim manuellen Anlegen neuer Datenpunkte ist die Angabe der ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Wertigkeit für eine Kombination notwendig.

Die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit setzt sich jeweils, wie in Kapitel 6.2 erläutert, aus den Ergebnissen einzelner Bewertungsverfahren zusammen. Die Einheiten der berechneten Kennwerte sind unterschiedlich (mPt, MJ, kg, ...) und müssen daher zunächst auf eine Bewertungsskala von 0 bis 10 normiert werden. Im Anschluss erfolgt eine gewichtete Addition der Ergebnisse zu der entsprechenden Wertigkeit. Die Verrechnung muss entweder manuell durchgeführt werden oder kann mithilfe von Makros innerhalb einer Excel-Tabelle automatisch ausgeführt werden. Die Übertragung der Bewertungsergebnisse aus den jeweiligen Datenbanken (z.B. [Gran15]) in das entwickelte Verrechnungsformular erfolgt aktuell noch manuell. Eine di-

rekte Anbindung zu den Datenbanken oder der Aufbau einer eigenen Datenbank ist ein zukünftiges Ziel der Softwarelösung. Durch die Gewichtungsfaktoren kann der Anwender festlegen, welchen Anteil ein Bewertungsergebnis an der zugehörigen Wertigkeit hat.

Sobald die Bewertungsergebnisse aller potenziellen Kombinationen in die Datenbank geladen wurden, kann die manuelle oder automatische Auswahl erfolgen. Dazu wird dem Anwender das in Abbildung 68 dargestellte User-Interface bereitgestellt.

Die allgemeine Vorgehensweise bei der Auswahl erfolgt hierarchisch, d.h. man arbeitet sich von der Startebene bis zur untersten Auswahlenebene sequentiell durch, bis alle Lösungen einer Kombination ausgewählt worden sind. Der Anwender kann entscheiden, ob er mit den Produktlösungen beginnt, sich über die Produktionssystemlösungen bis hin zu den Materiallösungen durcharbeitet oder eine andere Auswahlreihenfolge bevorzugt.

Im Auswahlbereich (Position 1) werden die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit der verschiedenen Lösungen in einem dreidimensionalen Koordinatensystem visualisiert. Der Anwender kann das Koordinatensystem in alle Richtungen drehen, um sich die räumliche Lage der Ergebnisse anzuschauen. Beim Klicken auf einen Datenpunkt wird in eine tiefere Ebene gewechselt.

Der in einer Ebene angezeigte Wert beinhaltet immer die besten Werte aus den darunterliegenden Ebenen. Das bedeutet, dass z.B. bei der Auswahl der Produktlösungen (oberste Ebene), die jeweils besten Produktionssystemlösungen und Materiallösungen (tiefere Ebenen) mit verrechnet sind. Diese Struktur macht eine sequentielle Auswahl erst möglich. Die Werte für die einzelnen Punkte können je nach Ebene größer als 10 sein. Das resultiert aus der Aggregation der darunterliegenden Werte der Produktionsfunktionen. Eine erneute Skalierung wäre zwar theoretisch möglich, bietet jedoch an dieser Stelle keinen direkten Mehrwert.

Die aktuellen Datenpunkte können jederzeit an Position 2 des User-Interface abgelesen werden. Sie sind anhand ihrer Wertigkeit absteigend sortiert. Innerhalb dieser Liste kann der Anwender ebenfalls die Datenpunkte auswählen. Wählt er immer den obersten Punkt, gelangt er gemäß den Werten zur besten Lösung. Diese Vorgehensweise berücksichtigt jedoch nicht das Wissen des Anwenders. Gerade bei dicht zusammenliegenden Punkten kann ein Experte die individuellen Randbedingungen besser berücksichtigen und dadurch eine zwar punktemäßig weniger gute, aber für den Anwendungsfall passendere Lösung auswählen.

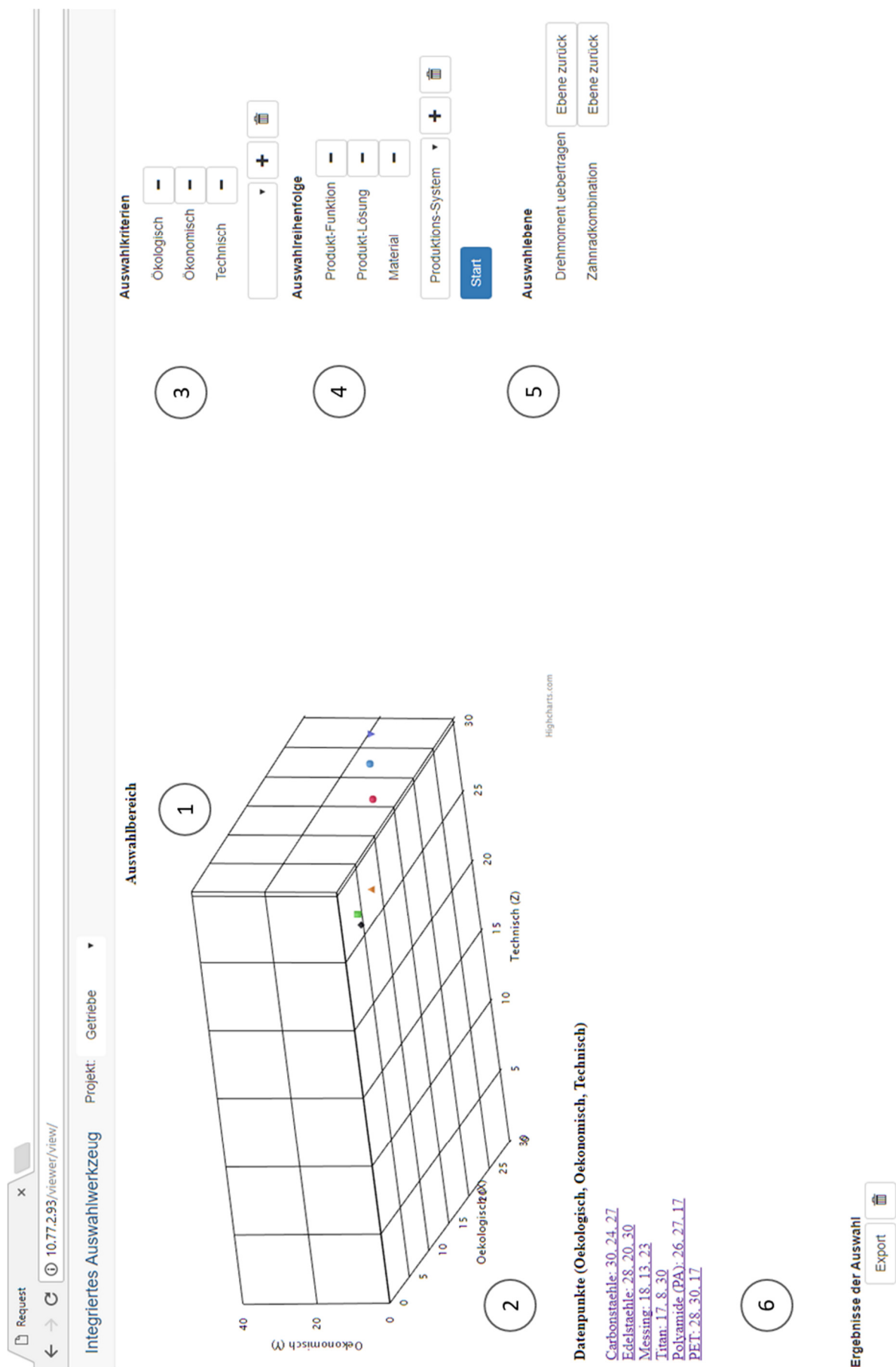


Abbildung 68: Übersichtsfenster des integrierten Auswahl-Tools

Neben der dreidimensionalen Darstellung der Ergebnisse ist auch eine zweidimensionale Sicht auf zwei Kriterien möglich. Der Anwender kann innerhalb des User-Interface (Position 3) jederzeit zwischen den angezeigten Auswahlkriterien umschalten. Es können beispielsweise nur die technische Wertigkeit und die ökologische Wertigkeit angezeigt werden, um eine Auswahl zwischen den beiden zu treffen. Wird beispielsweise nur die technische und die wirtschaftliche Wertigkeit angezeigt, entsteht ein Stärkediagramm nach der technisch-wirtschaftlichen Bewertung der VDI-Richtlinie 2225 [VDI2225].

Die Auswahlreihenfolge, die an Position 4 geändert werden kann, gibt vor, in welcher Sequenz die Lösungen im Auswahlbereich ausgewählt werden. Dabei bleibt anzumerken, dass nicht alle prinzipiell möglichen Reihenfolgen sinnvoll sind. Die Standardreihenfolge beginnt mit den Produktfunktionen, gefolgt von den Produktlösungen, den Materiallösungen, den Produktionsfunktionen und abschließend den Produktionssystemlösungen.

Über die Auswahl Ebene (Position 5) kann der Anwender jederzeit eine Ebene höher schalten, falls die zuvor getätigte Auswahl geändert werden soll.

Im Ergebnisbereich (Position 6) werden alle zuvor ausgewählten Lösungen aufgezeichnet. Sobald für eine Produktfunktion eine Produktlösung in Verbindung mit den zugehörigen Produktionssystemlösungen und Materiallösungen ausgewählt wurde, erscheint die Auswahl in dem Bereich. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis die Auswahl für alle Produktfunktionen erfolgreich war. Die Ergebnisse lassen sich auf Wunsch in eine Tabelle exportieren.

In der aktuellen Version werden die Gewichtungsfaktoren bei der Bewertung einmalig festgelegt und lassen sich innerhalb der Auswahlsoftware nicht mehr ändern. Diesen Punkt gilt es in künftigen Versionen zu ermöglichen. Des Weiteren ist die Anzeige der Zusammensetzung der Wertigkeiten aus den Einzelkriterien und deren Wert sowie den Gewichtungsfaktoren beim Anklicken einer Kombination erwünscht. Bei der Visualisierung wäre auch eine Anzeige der Kosten oder der Energiemenge vorstellbar, um konkrete Werte darzustellen.

Wertebereiche könnten innerhalb der Softwarelösung über Blasen angezeigt werden. Eine Möglichkeit zum Filtern bestimmter Bereiche im Auswahlfenster befähigt den Nutzer, bestimmte Lösungen anhand von Mindestwerten, die zu erfüllen sind, auszugrenzen. Die Entwicklung einer eigenen Datenstruktur ermöglicht eine einfachere Umsetzung, die nicht mehr drei verschiedene Software-Ebenen benötigt.

Der Aufbau einer eigenen Datenbank, die die erforderlichen Daten bündelt, würde zudem die Effizienz weiter erhöhen und eine Stand-Alone-Lösung ermöglichen. Alternativ wäre auch eine automatische Anbindung an externe Datenbanken möglich.

7 Validierungsbeispiele

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 6 vorgestellte integrierte Definition von Produkt, Produktionssystem und Material zur Steigerung der Ressourceneffizienz anhand zweier Beispiele validiert. Dabei soll gezeigt werden, dass sich die entwickelte Methodik, im Speziellen die integrierte Bewertung und Auswahl, prinzipiell auf konkrete Aufgabenstellungen anwenden lässt. Ein produktiver Einsatz kann in diesem Stadium verständlicherweise noch nicht realisiert werden. Beide Beispiele sind so gewählt worden, dass sie vom Umfang her im Rahmen dieser Arbeit dargestellt werden können.

Die Validierung des Ansatzes erfolgt dabei in zwei Teilen, da sich die Beschaffung der erforderlichen Daten für ein durchgehendes, konkretes Beispiel äußerst schwierig gestaltet. Die integrierte Konzeptdefinition wird auf ein nicht-schaltbares Getriebe für den Elektroantrieb eines Formula-Student-Rennwagens angewandt. Das Ziel ist es, zu zeigen, dass sich mithilfe der entwickelten Methodik ein innovatives ressourcenschonendes und zugleich technisch und wirtschaftlich wettbewerbsfähiges Konzept entwickeln lässt. Für die einzelnen Schritte werden nur exemplarisch Ausschnitte gezeigt. Um die Ergebnisse zu bewerten, wurden auch Möglichkeiten mitberücksichtigt, die auf den ersten Blick nicht direkt ersichtlich sind.

Die integrierte Komponentendefinition wird an einem begrenzten, aber konkreten Industriebeispiel, der Detailentwicklung (Änderungsentwicklung) eines Stoßdämpfers für Automobile, durchgeführt.

7.1 Entwicklung eines Konzepts für ein nicht-schaltbares Getriebe

Das Ziel dieses Validierungsbeispiels ist die Entwicklung eines nicht-schaltbaren Getriebes für das Antriebssystem eines Formula-Student-Rennwagens, um den Drehzahl- und Drehmomentbereich des Motors in einen für den Formula-Student-Rennwagen benötigten Bereich zu wandeln. Wesentliche Anteile der Aufgabenstellung wurden im Rahmen dieser Dissertation in einer Masterarbeit von Regitz [Regi17] bearbeitet.

Der Ablauf lässt sich grob wie folgt zusammenfassen. Zuerst müssen auf Basis der Anforderungen (siehe Tabelle 9; F bedeutet Forderung, W bedeutet Wunsch) geeignete potenzielle Wirkprinzipien, Technologien und Materialsuklassen ermittelt werden. Im Anschluss erfolgt die mehrdimensionale Bewertung aller möglichen Kombinationen daraus. Auf Basis der Ergebnisse lassen sich die besten Lösungen mithilfe der in Kapitel 6.4 vorgestellten Softwarelösung auswählen.

In der Funktionsentwicklung werden zuerst alle produktrelevanten Funktionen identifiziert, die erforderlich sind, um die Anforderungen (Tabelle 9) zu erfüllen. Aufgrund der mit der Anzahl an Funktionen steigenden Komplexität wird das Konzept ausschließlich auf Basis der in Tabelle 10 ermittelten Funktionen des Getriebes entwickelt. Die Produktfunktionen sind dabei neutral formuliert, um den Lösungsraum so groß wie möglich zu halten.

Nr.	Anforderungen	F / W
Produkt		
1	Gewicht ca. 7kg	F
2	Abmessungen max. 320mm x 280mm x 140mm	F
3	Betriebstemperatur ca. 70 °C	F
4	Eingangsdrehzahl 7500 min ⁻¹	F
5	Ausgangsdrehzahl 1250 min ⁻¹	F
6	Eingangsdrehmoment 74 Nm	F
7	Ausgangsdrehmoment 444 Nm	F
8	mechanische Nennleistung 23,8 kW	F
9	geringer Wartungsaufwand	W
10	geräuscharm	W
11	Wirkungsgrad	F
Produktion		
12	Verwendung von Standardbauteilen	W
13	Stückzahl 1	F
14	Herstellung in Deutschland	F
Material		
15	zerspanbar	W
16	hohe Oberflächengüte	W
17	dauerfest	F
18	keine plastische Verformung	F
19	geringe Wärmeausdehnung	W

Tabelle 9: Auszug aus der Anforderungsliste des Getriebes

Hauptfunktion	Funktionen
Drehmoment wandeln	Drehmoment einleiten
	Drehmoment ausleiten
	Drehmoment ändern
	Gehäusung

Tabelle 10: Wesentliche Funktionen des Getriebes

In der Prinzipientwicklung erfolgt daraufhin die Suche nach mehreren alternativen Wirkprinzipien, die die in Tabelle 10 gelisteten Funktionen realisieren können. Das Drehmoment kann beispielsweise über eine Keilwelle, eine Passfederverbindung oder einen Flansch eingeleitet werden. In Tabelle 11 sind alle alternativen Wirkprinzipien, die die Funktionen erfüllen können, aufgelistet.

Produktfunktion	Wirkprinzip
Drehmoment einleiten	Keilwelle
	Flansch
	Passfeder
Drehmoment ausleiten	Keilwelle
	Flansch
	Passfeder
Drehmoment ändern	Zahnradkombination
	Riemen plus Scheibe
	hydr. Drehmomentwandler
Gehäusung	umschließendes Gehäuse

Tabelle 11: Alternative Wirkprinzipien zur Funktionserfüllung

Da sich die Wirkprinzipien sowohl aus physikalischen Effekten als auch aus einer groben Geometrie zusammensetzen, ist es an dieser Stelle auch möglich erste Produktionsfunktionen zur Herstellung und die groben erforderlichen Materialeigenschaften in Verbindung mit den Anforderungen zu bestimmen. Zur Herstellung der Zahnräder einer Zahnradkombination sind beispielsweise unter anderem die Produktionsfunktionen „Form herstellen“, „Form anpassen“ und „Eigenschaften anpassen“ erforderlich. Aufgrund der mit der Anzahl der Funktionen steigenden Komplexität werden für dieses Beispiel nur die in Tabelle 12 gezeigten Funktionen mit den alternativen Technologien weiterverwendet. Die entsprechenden Materialeigenschaften lassen sich aus den Wirkprinzipien und den Produkt- bzw. Materialanforderungen ableiten. Nachdem die erforderlichen Eigenschaften ermittelt wurden, können beispielsweise mit entsprechender Softwareunterstützung, wie dem CES EduPack [Gran15], geeignete Materialsubklassen ausgewählt werden. Die Software bietet eine große Datenbank an unterschiedlichen Materialien und ermöglicht dem Anwender über Trade-Off Diagramme sehr effizient Materialklassen, Materialsubklassen und Materialien auszuwählen [Gran15].

Produktionsfunktion	Technologie
Form herstellen	Gießen
	Pulvermetallurgie
	Kunststoffextrusion
	Kunststoffgießen
Form anpassen	Schleifen
	Fräsen
	Drehen
	Wälzfräsen
	Wälzschleifen
Eigenschaften ändern	Härteofen
	Induktionshärten

Tabelle 12: Betrachtete Produktionsfunktionen mit alternativen Technologien zur Herstellung des Getriebes

Die Ergebnisse der Eigenschaftsdefinition und Klassenauswahl sind in Tabelle 13 dargestellt. Dabei wurden auch Materialien wie Messing oder Kunststoffe mitbetrachtet, um zu zeigen, dass im Laufe des Auswahlprozesses diese Lösungen verworfen werden. Im Software-Prototyp wird der unlegierte Stahl als Carbonstahl aufgeführt. Wie man bereits an dem gerade beschriebenen, im Umfang reduzierten Beispiel sehen kann, gestaltet sich die Aufstellung der Lösungen sehr aufwändig. Die Suche nach geeigneten Produktionsfunktionen und Technologien sowie Materialsubklassen muss zunächst durchgeführt werden. Sobald die Ergebnisse jedoch erarbeitet wurden, können sie als Datensätze im integrierten Auswahl-Tool gespeichert und für zukünftige Projekte bereitgestellt werden. Dadurch sinkt sowohl der zeitliche Aufwand als auch der Aufwand für die Datenbeschaffung enorm. Aus diesem Grund ist der Aufbau einer eigenen Datenbank äußerst sinnvoll. Gerade bei den Materialien würde sich eine solche Vorgehensweise lohnen, könnte man so auf die Suche nach entsprechenden Materialeigenschaften verzichten und die Materialsubklassen direkt mit den Wirkprinzipien verknüpfen.

Wirkprinzip	Materialeigenschaften	Materialsubklasse
Keilwelle Flansch Passfeder	Dauerfestigkeit	Unlegierter Stahl (hoch)
	geringe Dichte	Rostfreier Stahl
	geringe Wärmeausdehnung	Titan (Beta)
	Festigkeit	
	Elastizität	
Zahnradkombination	hohe Materialhärte	Unlegierter Stahl (hoch)
	Dauerfestigkeit	Rostfreier Stahl
		Titan (Beta) Messing (Knet) (PET (pur)) (PA (pur))
hydr. Drehmomentwandler	Dauerfestigkeit	Titan (Beta)
	gute Wärmeübertragung	
umschließendes Gehäuse	geringe Dichte	Aluminium (Guss)
	Dauerfestigkeit	Rostfreier Stahl
	korrosionsbeständig	Titan (Beta)
	zerspanbar	
Riemen plus Scheibe	hohe Elastizität	Gummi (NBR)
	Dämpfung	
	mittlere Festigkeit	Aluminium (Guss)
	geringe Dichte	
	hohe Dauerfestigkeit	

Tabelle 13: Aus den Wirkprinzipien abgeleitete Materialeigenschaften und Materialsubklassen

Im nächsten Schritt erfolgt schließlich die Bewertung potenzieller Kombination aus den zuvor aufgestellten Lösungen. Damit die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit für alle Kombinationen in das graphische Auswahlwerkzeug importiert werden können, müssen die Daten entsprechend aufbereitet werden (siehe Tabelle 14). In dem hier Schritt für Schritt abgearbeiteten Beispiel setzt sich die technische Wertigkeit aus einer Kombination der technischen Wertigkeit des Wirkprinzips, der technischen Wertigkeit des Wirkprinzips in Kombination mit dem Werkstoff und der technischen Wertigkeit des Wirkprinzips in Kombination mit der Technologie zusammen. Die wirtschaftliche Wertigkeit wird durch die Kosten für die Bereitstellung des Materials und die Kosten für die Herstellung bestimmt. Die ökologische Wertigkeit setzt sich aus einer Abschätzung des Wirkungsgrads während der Nutzung, einer Ressourcenkritikalitätsanalyse, dem Energieaufwand für die Bereitstellung und Entsorgung des Materials und dem Energieaufwand für die Herstellung sowie der CO₂-Bilanz aus Bereitstellung, Herstellung und Entsorgung zusammen.

Material ID	Materialsubklasse	Product ID	Wirkprinzip	Production ID	Technologie	Oekologisch Wertigkeit	Oekonomische Wertigkeit	Technische Wertigkeit
1	Unleg. Stahl	1	Zahnradkombination	1	Gießen	10	6	9
1	Unleg. Stahl	1	Zahnradkombination	2	Pulvermetallurgie	8	6	9
1	Unleg. Stahl	1	Zahnradkombination	3	Kunststoffextrusion	0	0	0
	...							
	...							

Tabelle 14: Bewertungsformular für die Kombinationen aus Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen

Zur Bewertung der Wertigkeiten wäre eine qualitative Bewertung, basierend auf Expertenwissen möglich. Um belastbarere Ergebnisse zu erhalten, wird jedoch, sofern möglich, auf entsprechende Datenbanken zurückgegriffen. Mithilfe des CES EduPack [Gran15] können bereits die Materialkosten, die Energieaufwände sowie die CO₂-Bilanzen für die Herstellung und Entsorgung ermittelt werden. Die in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 gezeigten Daten sind bereits auf eine Bewertungsskala von 0-10 normiert und entstammen dem CES EduPack [Gran15].

Material	Materialkosten	KEA Bereitstellung	Ress. Kritik.	Ressourcenaufwand
Unleg. Stahl	10	10	10	10
Rostfreier Stahl	9	10	7	9
Messing	9	10	7	1
Aluminium (Guss)	10	8	8	9
Titan (beta)	1	1	5	4
PA	8	9	6	10
PET	10	10	6	10
Gummi plus Aluminium	9	9	6	10

Tabelle 15: Kosten, Energieaufwand, Ressourcenkritikalität sowie Ressourcenaufwand ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15])

Material	Technologie		
	Gießen	Pulvermetallurgie	Kunststoffgießen
Unleg. Stahl	8	1	0
Rostfreier Stahl	8	2	0
Messing	9	5	0
Aluminium (Guss)	8	5	0
Titan (beta)	8	1	0
PA	0	0	5
PET	0	0	6
Gummi plus Aluminium	0	0	7

Tabelle 16: Auszug aus dem Energieaufwand verschiedener Technologien in Abhängigkeit ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15])

Material	Technologie		
	Gießen	Pulvermetallurgie	Kunststoffgießen
Unleg. Stahl	1	1	0
Rostfreier Stahl	1	1	0
Messing	1	1	0
Aluminium (Guss)	1	1	0
Titan (beta)	1	1	0
PA	1	0	3
PET	0	0	3
Gummi plus Aluminium	0	0	3

Tabelle 17: Auszug aus den Kosten verschiedener Technologien in Abhängigkeit ausgewählter Materialien (basierend auf Daten von [Gran15])

Die Kennwerte für die Material-Intensitäten sind aus [WELR11] und [Wupp14] entnommen. In diesem Beispiel wird für die Material-Intensität nur der abiotische Wert verwendet, da die restlichen Werte nicht für alle Materialien zugänglich waren. Der Wasser- und Luftverbrauch gehört standardmäßig ebenfalls zu diesem Kennwert und kann bei mehreren 100 kg pro kg Material (z.B. PA: 921 kg/kg) liegen. Tabelle 18 beinhaltet den abiotischen Ressourcenaufwand in kg pro kg Material.

Material	Ressourcenaufwand (ab) kg/kg	(normiert)
Unleg. Stahl	1,47	10
Rostfreier Stahl	16,785	9
Messing	131,877	1
Aluminium (Guss)	18,9	9
Titan (beta)	100	4
PA	5,51	10
PET	6	10
Gummi plus Aluminium	14 (geschätzt)	10

Tabelle 18: Material-Intensität (abiotisch) für verschiedene Materialien (basierend auf Daten von [WELR11, Wupp14])

Die hier exemplarisch verwendeten Datenquellen sind in der Anwendung besonders einfach und gut zugänglich (sofern man Zugriff auf die Software hat) und ergeben somit Vorteile für die Ressourcennutzung innerhalb der Entwicklung. Trotzdem können, wie schon in Kapitel 6.2.1 erwähnt, problemlos alternative Bewertungsmethoden bzw. Datenquellen eingesetzt werden.

Die Ermittlung der technischen Wertigkeit erfolgt hingegen qualitativ, obwohl die Bewertung durch die Betrachtung von quantitativen Werkstoff- und Technologieeigenschaften unterstützt werden kann. Sie setzt sich in diesem Beispiel aus der technischen Wertigkeit des Wirkprinzips, der technischen Wertigkeit der Kombination aus Wirkprinzip und Technologie sowie der technischen Wertigkeit der Kombination aus Material und Wirkprinzip zusammen. In Tabelle 19 sind beispielhaft Kriterien für die technische Bewertung der Wirkprinzipien für die Funktion „Drehmoment wandeln“ vorgestellt. Die Kriterien hängen stark von den Anforderungen und den Funktionen ab.

In der Komponentenphase können an dieser Stelle verschiedene Simulationsverfahren eingesetzt werden, um konkrete Werte für die Kriterien zu erhalten, die dann wiederum auf die Bewertungsskala von 0-10 normiert werden.

Wert	Wirkungsgrad	Wartungsfreiheit	Geräuschentwicklung	Vibrationen	Überlastschutz
Gew.	0,35	0,2	0,2	0,15	0,1
1	50%	-	-	-	-
2	55%	Verschleißteile tauschen alle Lebensdauer/8 Zeiteinheiten	sehr lauter Betrieb	sehr starke Vibrationen	kein Überlastschutz/schwere Schäden
3	60%	-	-	-	-
4	65%	Verschleißteile tauschen alle Lebensdauer/4 Zeiteinheiten	lauter Betrieb	starke Vibrationen	kein Überlastschutz/leichte Schäden
5	70%	-	-	-	-
6	75%	Verschleißteile tauschen alle Lebensdauer/2 Zeiteinheiten	hörbare Geräusche	wahrnehmbare Vibrationen	stärkerer Verschleiß durch Überlast
7	80%	-	-	-	-
8	85%	Betriebsstoff tauschen	leiser Betrieb	geringe Vibrationen	langsamer Verschleiß durch Überlast
9	90%	-	-	-	-
10	95%	keine Wartung	sehr leiser Betrieb	keine Vibrationen	automatischer Überlastschutz

Tabelle 19: Berechnung der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien

Die herstellbare Oberflächengüte oder die Fertigungstoleranz haben beispielsweise einen Einfluss auf die technische Wertigkeit des Wirkprinzips. Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 20 und Tabelle 21) beinhalten einen Auszug aus den Werten für das nicht-schaltbare Getriebe. Auf Basis der ermittelten Kennwerte lässt sich schließlich die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit berechnen. Dazu wird mithilfe von Gewichtungsfaktoren die Summe der einzelnen Anteile berechnet. Die Gewichtung der einzelnen Anteile ist ein heikles Unterfangen, setzt es doch die Entscheidung, welches Kriterium wichtiger ist, voraus. Es stellt sich die Frage ob beispielsweise der Energieverbrauch oder die Ressourcenkritikalität mehr Gewicht hat. Dieses Problem muss für jedes Szenario individuell betrachtet werden.

Wirkprinzip	Technologie		
	Gießen	Pulvermetallurgie	Kunststoffgießen
Zahnradkombination	8	8	3
Riemen plus Scheibe	8	8	0
hydr. Drehmomentwandler	8	1	0
Keilwelle	6	0	0
Flansch	6	0	0
Passfeder	6	0	0
umschließendes Gehäuse	10	0	0

Tabelle 20: Auszug aus der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien in Abhängigkeit der Technologien

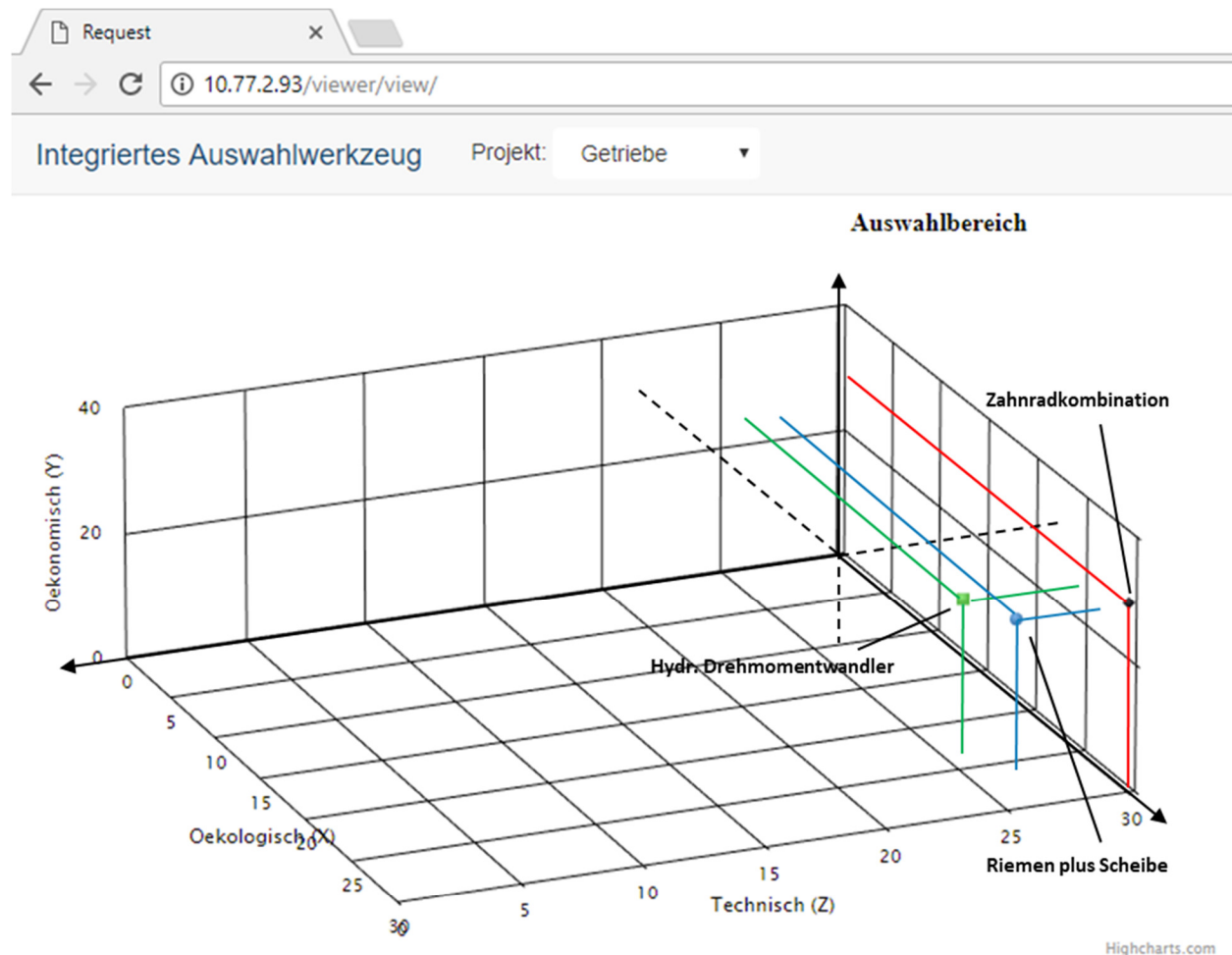
Material	Wirkprinzip		
	Zahnradkombination	Riemen plus Scheibe	hydr. Drehmomentwandler
Unleg. Stahl	8	0	8
Rostfreier Stahl	10	0	10
Messing	5	0	0
Aluminium (Guss)	0	0	0
Titan (beta)	10	0	10
PA	1	0	0
PET	1	0	0
Gummi plus Aluminium	0	10	0

Tabelle 21: Auszug aus der technischen Wertigkeit der Wirkprinzipien in Abhängigkeit der Materialien

Die berechneten Wertigkeiten können anschließend in das integrierte Auswahl-Tool importiert werden. Bereits in die Datenbank eingepflegte Werte sind nachfolgend auch für weitere Aufgabenstellungen nutzbar. Mithilfe des in Abbildung 69 dargestellten Auswahlbereichs können die besten Lösungen Schritt für Schritt ausgewählt werden. Für die Funktion „Drehmoment ändern“ wird im Folgenden exemplarisch die Auswahl durchgespielt.

Der Auswahlvorgang beginnt mit der Festlegung der zu betrachtenden Kriterien (ökologisch, technisch, wirtschaftlich). Im Sinne einer ganzheitlichen Bewertung und Auswahl werden in diesem Beispiel alle drei Kriterien berücksichtigt. Im Anschluss an die Einstellung der Auswahlreihenfolge werden die Produktfunktionen im Auswahlfenster angezeigt. Für alle angezeigten Funktionen erfolgt schrittweise die Auswahl der besten Wirkprinzipien, Materialien und Technologien.

Für die Funktion „Drehmoment ändern“, werden die drei alternativen Wirkprinzipien Zahnradkombination, Riemen plus Scheibe und hydrodynamischer Drehmomentwandler angezeigt. Das beste Wirkprinzip (der angezeigte Wert beinhaltet die Aggregation der darunterliegenden Lösungen) ist in dem konkreten Beispiel die Zahnradkombination.



Datenpunkte (Oekologisch, Oekonomisch, Technisch)

Zahnradkombination: 30, 30, 30

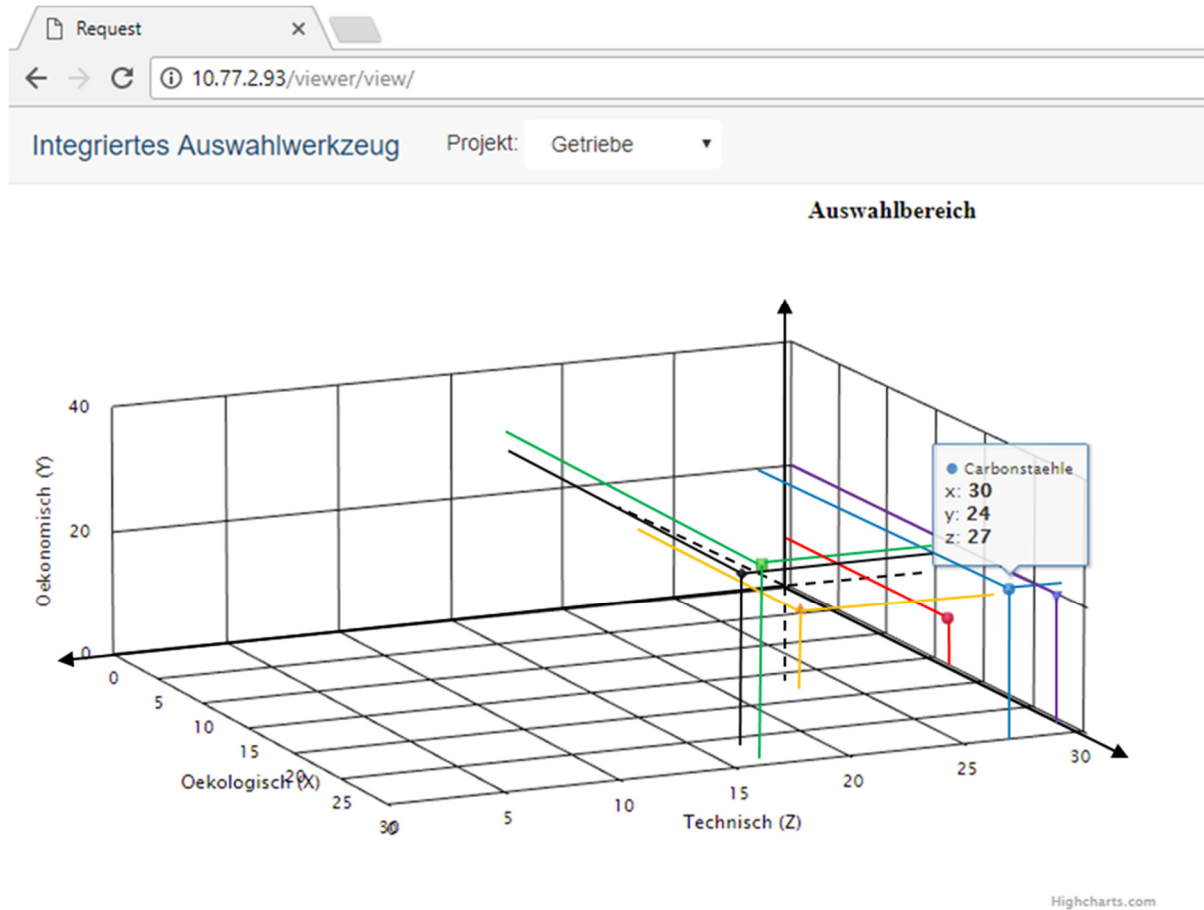
Riemen plus Scheibe: 26, 24, 27

hydr. Drehmomentwandler: 23, 24, 26

Abbildung 69: Auswahlfenster für die Produktfunktion „Drehmoment übertragen“ (für Druckversion nachbearbeitet)

Sobald ein Wirkprinzip angewählt wurde, öffnen sich die untergeordneten Datenpunkte. In diesem Fall können im Anschluss die verschiedenen Materialsuklassen ausgewählt werden. Abbildung 70 zeigt die dargestellten Punkte, die der Nutzer auswählen kann. In diesem Beispiel wurden jeweils die ökologisch besten Kombinationen ausgewählt.

Nachdem für alle Produktfunktionen Materialsubklassen und Herstellungstechnologien ausgewählt wurden, ist der Auswahlprozess beendet. Bei der Herstellung der Keilwelle wird von einer entsprechenden Welle ausgegangen.



Datenpunkte (Oekologisch, Oekonomisch, Technisch)

[Carbonstaehle: 30, 24, 27](#)
[Edelstaehle: 28, 20, 30](#)
[Messing: 18, 13, 23](#)
[Titan: 17, 8, 30](#)
[Polyamide \(PA\): 26, 27, 17](#)
[PET: 28, 30, 17](#)

Abbildung 70: Auswahlfenster für alternative Materialsubklassen für eine Zahnradkombination (für Druckversion nachbearbeitet)

Die Ergebnisse können Abbildung 71 entnommen werden. Anschließend können die Ergebnisse in eine Tabelle exportiert und weiterverarbeitet werden. In Kapitel 7.3 werden schließlich die Ergebnisse diskutiert und der daraus resultierende weitere Entwicklungsbedarf abgeleitet.

Ergebnisse der Auswahl

- Drehmoment uebertragen
 - Zahnradkombination
 - Carbonstaehle
 - Form herstellen
 - Giessen: (10, 6, 9)
 - Form anpassen
 - Waelzfraesen: (10, 9, 9)
 - Eigenschaften aendern
 - Induktionshaerten: (10, 9, 9)
- Drehmoment einleiten
 - Keilwelle ein
 - Carbonstaehle
 - Form anpassen
 - Fraesen: (10, 9, 9)
 - Eigenschaften aendern
 - Induktionshaerten: (10, 9, 9)
- Drehmoment ausleiten
 - Keilwelle aus
 - Carbonstaehle
 - Form anpassen
 - Fraesen: (10, 9, 9)
 - Eigenschaften aendern
 - Induktionshaerten: (10, 9, 9)
- Gehaeusung
 - umschliessendes Gehaeuse
 - Carbonstaehle
 - Form herstellen
 - Giessen: (9, 6, 9)
 - Form anpassen
 - Fraesen: (9, 9, 7)

Export



Abbildung 71: Ergebnisse der Auswahl für das nicht-schaltbare Getriebe

7.2 Änderungsentwicklung eines Stoßdämpfers

Als Validierungsbeispiel für die integrierte Komponentendefinition wird die Änderungsentwicklung eines hydraulischen Stoßdämpfers für PKW herangezogen. Wesentliche Anteile der Aufgabenstellung wurden im Rahmen dieser Dissertation in einer Masterseminararbeit von Schmidt [Schm17] bearbeitet.

Ein Stoßdämpfer hat die Aufgabe, die bei der Fahrt entstehenden Schwingungen zu dämpfen. Das Ziel dieser Änderungsentwicklung ist die Reduzierung von Ausschussteilen während der Herstellung, um die Ressourceneffizienz zu erhöhen und Kosten zu senken. Dazu soll der Fügeprozess zwischen Rohr und Gabel von einem Laserschweißen auf ein Lötverfahren (Hartlöten) umgestellt

werden. Fehlerhafte Verbindungsstellen, die nicht gasdicht sind lassen sich somit wieder auftrennen und anschließend erneut herstellen. Um eine größtmögliche Kompatibilität zum Vorgänger zu erreichen, betreffen die Änderungen nur die Verbindungsstelle. [Schm17]

In Tabelle 22 befindet sich ein Ausschnitt aus den relevanten Anforderungen, die an das Produkt gestellt werden.

Nr.	Anforderungen	F / W
Produkt		
1	Belastung: 40 kN statisch	F
2	keine wahrnehmbaren Vibrationen	F
3	keine wahrnehmbaren Geräusche	F
4	Betriebstemperatur: min. 120 °C	F
5	Lastwechsel: min. 1.000.000	F
Produktion		
12	lösbare Fügestelle zwischen Rohr und Gabel	W
13	Stückzahl: 300.000 Stück pro Jahr	F
14	Herstellung in Deutschland	F
Material		
15	zerspanbar	F
16	korrosionsbeständig	W
17	dauerfest	F
18	keine plastische Verformung	F
19	schmiedbar	F

Tabelle 22: Auszug aus der Anforderungsliste des Stoßdämpfers (in Anlehnung an [Schm17])

In den jeweiligen Fachbereichen werden dazu die entsprechenden Lösungen generiert. Durch die geforderte Kompatibilität ist der Änderungsspielraum bei der Gestalt eingeschränkt.

Es ergeben sich zwei konkrete alternative Kombinationen für die Produktgestalt. Der Fokus liegt hierbei auf der Fügestelle. Die konstruktiven Änderungen betreffen in erster Linie die Überlappung zwischen Rohr und Gabel (siehe Abbildung 72 a). Abbildung 72 b) und c) zeigen die unterschiedlichen Gestaltvarianten der Fügestelle. [Schm17]

Durch die Betrachtung alternativer Materialien für das Rohr im Rahmen der Evaluation ergeben sich leicht unterschiedliche Wandstärken, die jedoch bei den Kombinationen nicht weiter unterschieden werden, da der geometrische Einfluss nur gering ist. Über das resultierende Gewicht und die draus folgenden technischen und ökologischen Wertigkeiten fließen diese Betrachtungen in die Bewertung und Auswahl mit ein.

Zur Herstellung der Verbindungsstelle stehen eine automatisierte Laserschweißanlage, Induktionslötanlage und Flammlötanlage zur Auswahl. Die automatisierte Laserschweißanlage ermöglicht einen Fügeprozess ohne zusätzliche Stoffe, während bei den Lötanlagen zusätzliches Lot verwendet wird. Außerdem ist der tatsächliche Energieverbrauch bei der Laserschweißanlage geringer, da der Energieeintrag nur punktuell stattfindet. [Schm17]

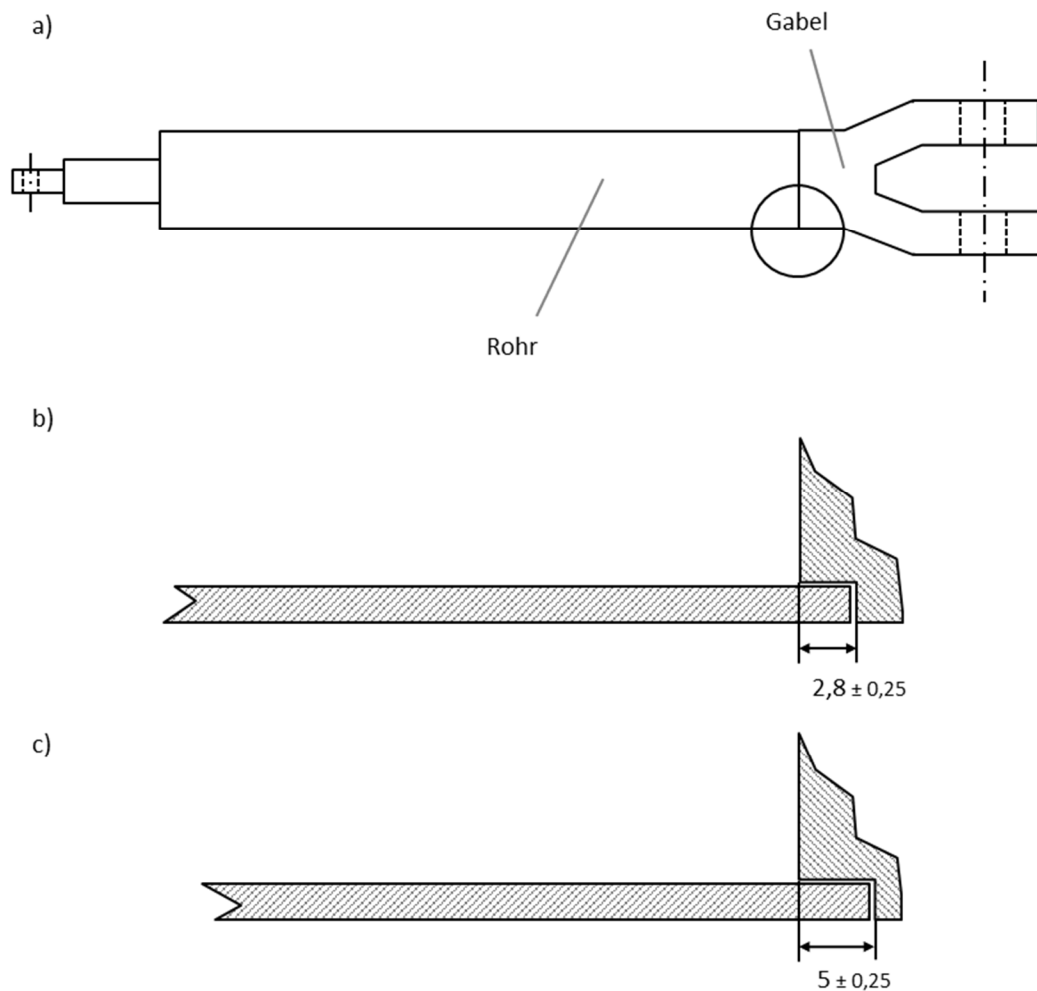


Abbildung 72: a) PKW Stoßdämpfer b) Gestaltvariante 1 des Stoßdämpfers c) Gestaltvariante 2 des Stoßdämpfers (in Anlehnung an [Schm17])

Der Vorteil der Lötanlagen liegt in der leichteren Auftrennung der Fügestelle um eventuelle Nachbesserungen vorzunehmen. Die Systemgrenze bei der Herstellung bezieht sich aufgrund des Umfangs in diesem Beispiel auf den Fügeprozess zur Formherstellung. Diese Einschränkung ist möglich, da die restlichen Prozesse unverändert bleiben. Ein weiterer Vorteil für das Lötverfahren resultiert aus dem geringeren Wärmeverzug der Teile durch den Fügeprozess. Während die Gabel aus Stahl (1.8907) hergestellt wird, können gemäß der folgenden Aufzählung verschiedene

alternative Materialien zur Herstellung des Rohrs eingesetzt werden. Die Materialien wurden dabei mithilfe des CES EduPack (Gran15) anhand ihrer mechanischen Eigenschaften ausgewählt:

- Unlegierter Stahl 1.0308
- Aluminium 6022
- Rostfreier Stahl 1.4373

Der unlegierte Stahl ist vor allen Dingen sehr günstig und weist die besten ökologischen Eigenschaften bei der Materialbereitstellung auf. Das Aluminium besitzt ein besseres Leichtbaupotenzial und kann somit vor allem im Betrieb die ökologischen Kriterien verbessern. Der rostfreie Stahl ermöglicht, genau wie das Aluminium, den Verzicht auf eine zusätzliche Korrosionsschutzschicht. Um die bestmögliche Kombination aus Gestaltvariante, Anlage und Material zu bestimmen, erfolgt zuerst die Bewertung der verschiedenen alternativen Kombinationen. Basierend auf den Ergebnissen wird im Anschluss die Ermittlung der besten Kombination mithilfe des integrierten morphologischen Kastens, bzw. der dafür entwickelten Softwarelösung, durchgeführt. Die ökologisch-technisch-wirtschaftliche Bewertung unterstützt hierbei die Suche nach der Lösungskombination mit dem niedrigsten Ressourceneinsatz und den geringsten Kosten, bei vorgegebener technischer Leistung.

Für dieses Beispiel wurden neben den in Kapitel 6.2 verwendeten ökologischen Bewertungskriterien, ein zusätzliches Kriterium verwendet. Dadurch lässt sich der Ausschuss bei der Herstellung berücksichtigen, der sich negativ auf den Ressourceneinsatz auswirkt. Die Wertigkeit für dieses Kriterium kann beispielsweise anhand eines Bewertungsschemas, wie es in Tabelle 23 abgebildet ist, ermittelt werden.

Somit ist es möglich, diesen Aspekt in die Bewertung zu integrieren. Der derzeitige Ausschuss aufgrund einer fehlerhaften Verbindung beträgt etwa 1,5 %. Eine Nachbesserung ist mit dem Schweißverfahren nicht möglich, weshalb das Teil entsorgt werden muss. Eine Umstellung auf ein Lötverfahren ermöglicht hingegen die Nachbesserung der Teile.

Wert	Ausschussrate	Nachbesserung
1	-	-
2	max. 3%	Entsorgung
3	-	-
4	max. 2,5%	schwierig
5	-	-
6	max. 2%	mittel
7	-	-
8	max. 1,5%	einfach
9	-	-
10	max. 1%	sehr einfach

Tabelle 23: Bewertungskriterien für den Umgang mit Ausschuss aus ökologischer Sicht

In Tabelle 24 sind beispielhaft die Kosten, der kumulierte Energieaufwand und die Ressourcenkritikalität für die verschiedenen Materialien abgebildet. In Tabelle 25 wurden diese Werte auf die Bewertungsskala von 0-10 normiert.

Material	Materialkosten	KEA Bereitstellung	Ress. Kritik.
Stahl 1.0308	0,41 €/kg	32,35 MJ/kg	10
Aluminium 6022	1,67 €/kg	199,5 MJ/kg	5
Rostfreier Stahl 1.4373	2,19 €/kg	57,2 MJ/kg	7

Tabelle 24: Materialkosten, Energieaufwand für die Materialbereitstellung und Ressourcenkritikalität (in Anlehnung an [Schm17], basierend auf Daten von [Gran15])

Material	Materialkosten	KEA Bereitstellung	Ress. Kritik.
Stahl 1.0308	10	10	10
Aluminium 6022	4	1	5
Rostfreier Stahl 1.4373	1	9	7

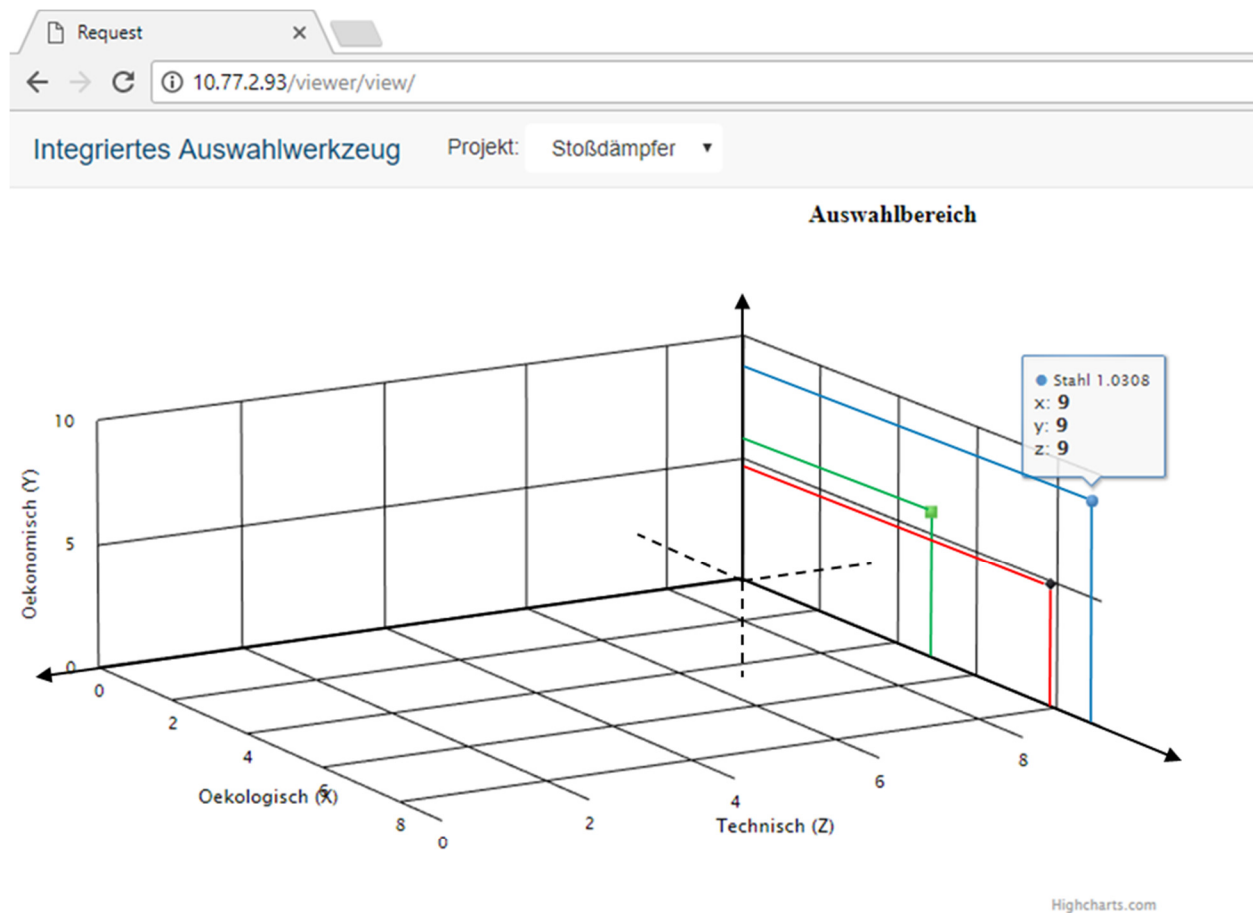
Tabelle 25: Normierte Werte für Materialkosten, Energieaufwand für die Materialbereitstellung und Ressourcenkritikalität (in Anlehnung an [Schm17], basierend auf Daten von [Gran15])

Die technische Wertigkeit einer möglichen Kombination setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Als Beispiel dafür ist die technische Wertigkeit des Materials in Abhängigkeit der Anlage in Tabelle 26 dargestellt. Das Flammlöten eignet sich beispielsweise sehr gut für das Fügen unterschiedlicher Materialkombinationen, erwärmt jedoch einen größeren Bereich der Bauteile als das Induktionslöten.

Material	Anlage		
	Laserschweißan- lage	Induktionslötanlage	Flammlötan- lage
Stahl 1.0308	10	10	8
Aluminium 6022	6	8	8
Rostfreier Stahl 1.4373	6	8	8

Tabelle 26: Technische Wertigkeit des Materials in Abhängigkeit der Produktionsanlage

Alle Bewertungsergebnisse werden anschließend in den integrierten morphologischen Kasten geladen. Auf dieser Basis kann im Anschluss die grafische Auswahl der besten Lösung erfolgen. Auf der ersten Ebene wird die Funktion „Schwingungen dämpfen“ ausgewählt. Danach hat der Nutzer die Möglichkeit, zwischen den beiden Gestaltvarianten zu wählen. Gestaltvariante 2 hat die besseren Bewertungsergebnisse. In der darunterliegenden Ebene erfolgt schließlich die Wahl zwischen den Materialien. Wie in Abbildung 73 zu erkennen ist, weist der unlegierte Stahl die besten Werte auf.



Datenpunkte (Oekologisch, Oekonomisch, Technisch)

[Stahl 1.0308: 9, 9, 9](#)

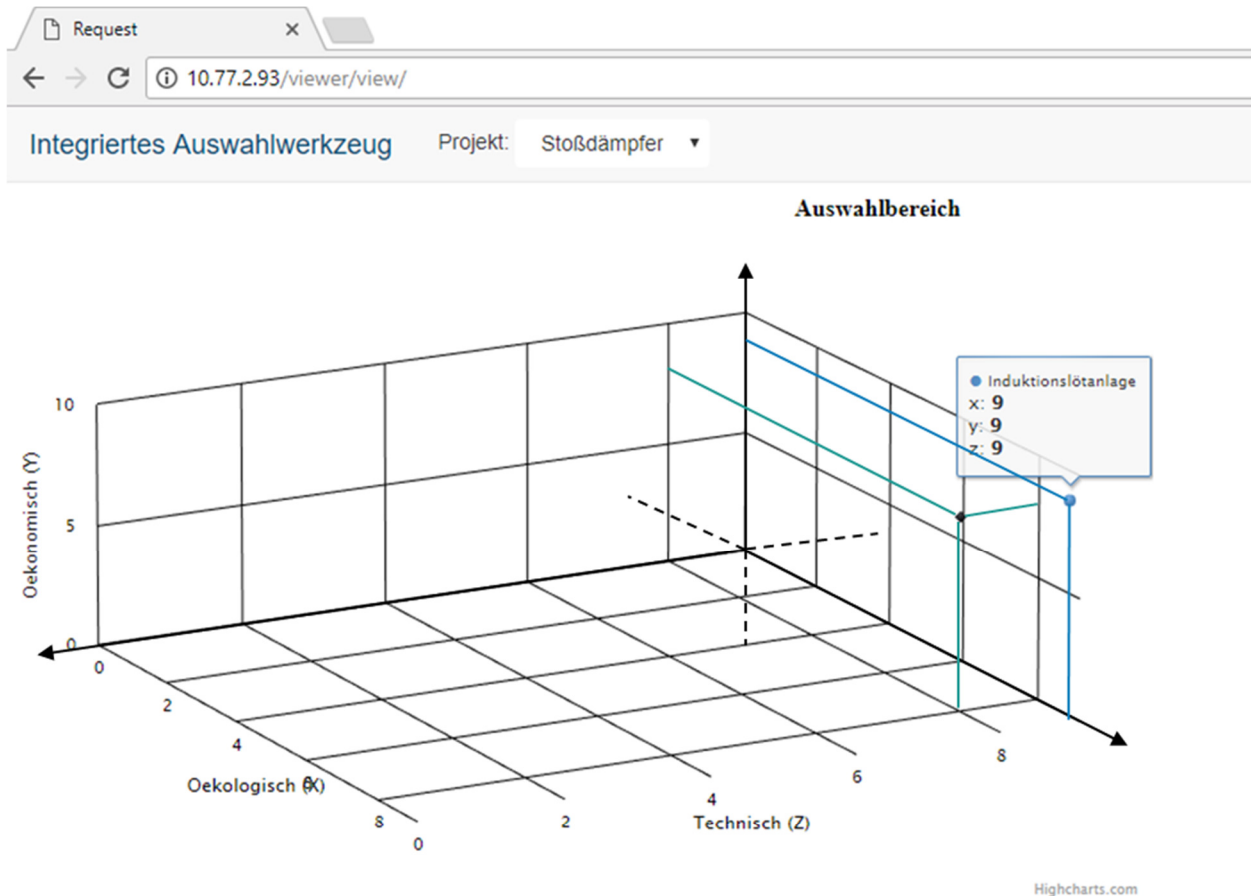
[Aluminium 6022: 5, 6, 9](#)

[Rostfreier Stahl 1.4373: 8, 5, 9](#)

Abbildung 73: Auswahl des Materials für das Stoßdämpferrohr (in Anlehnung an [Schm17], für Druckversion nachbearbeitet)

Im letzten Auswahlschritt (siehe Abbildung 74) wird die Auswahl der besten Produktionsanlage durchgeführt. Die Induktionslötanlage setzt sich mit den besten Werte ab.

Die Kombination aus der Gestaltvariante 2 in Verbindung mit dem unlegierten Stahl (1.0308) und der automatisierten Lötanlage stellt somit das Ergebnis des Auswahlprozesses dar.



Datenpunkte (Oekologisch, Oekonomisch, Technisch)

[Laserschweißanlage: 8, 8, 8](#)

[Induktionslötanlage: 9, 9, 9](#)

[Flammlötanlage: 8, 8, 8](#)

Abbildung 74: Auswahl der Produktionsanlage für den Fügevorgang (in Anlehnung an [Schm17], für Druckversion nachbearbeitet))

7.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Anwendung des entwickelten Gesamtkonzepts auf die ausgewählten Beispiele hat gezeigt, dass es möglich ist, eine umfassende Ressourcenbetrachtung über ökologische, technische und wirtschaftliche Kriterien in die Entwicklung zu integrieren.

Bei dem Beispiel des Getriebes hat sich gezeigt, dass durch das über Jahre aufgebaute Wissen bei der Entwicklung von Getrieben ein sehr gutes Ergebnis bezüglich der Ressourceneffizienz erarbeitet worden ist. Die Änderungsentwicklung eines Stoßdämpfers für PKW hat zudem die Anwendbarkeit auf die Komponentenphase verdeutlicht.

Die Verwendung von entsprechenden Datenbanken ermöglicht eine effiziente Durchführung, so dass eine operative Nutzung prinzipiell möglich ist. Der Arbeitsaufwand ist dadurch während der

Entwicklung logischerweise höher, kann aber durch geringere Änderungsarbeiten wieder eingespart werden.

Mithilfe des im Software-Prototypen umgesetzten integrierten morphologischen Kastens können zudem auch Lösungen betrachtet werden, die auf den ersten Blick nicht direkt im Blickwinkel des Anwenders liegen.

Die Gewichtung der einzelnen Bestandteile der Wertigkeiten, die je nach Szenario zu wählen ist, obliegt dem Anwender. Er muss entscheiden, welche Kriterien z.B. für das Unternehmen oder das jeweilige Land eine höhere Priorität haben.

Bei der Materialauswahl hat sich gezeigt, dass eine Unterteilung der Materialien in Subklassen nicht immer ausreichend ist. Bei den unlegierten Stählen würde sich beispielsweise eine weitere Aufteilung in niedrigfeste unlegierte Stähle und mittel- und hochfeste unlegierte Stähle anbieten, um eine bessere Einteilung der Eigenschaften zu gewährleisten.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass, wenn eine eigene Datenbank mit Wertigkeiten für verschiedene Kombinationen aufgestellt wurde, die potenziellen Materialklassen direkt aus den Wirkprinzipien ableitbar sind. Die Verwendung entsprechender Datenbanken wie der CES-Software [Gran15] in der die Werte für einzelne Materialien hinterlegt sind, erleichtert die Beschaffung der Daten. Um die Eigenschaften für die Materialsubklasse zu erhalten, müssen die Werte der darunterliegenden Materialien gemittelt werden. Durch das Mitteln der Werte können jedoch Ausreißer nicht mehr mitbetrachtet werden.

Das Abbilden von nicht erforderlichen Produktionsfunktionen beim Vergleich unterschiedlicher Lösungen hat sich als schwierig herausgestellt und kann mit der aktuellen Datenstruktur nur über Umwege berücksichtigt werden. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In Kapitel 8 erfolgt zunächst die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und die Beantwortung der Forschungsfragen. Anschließend werden die Ergebnisse der Arbeit und der Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf dargestellt.

8.1 Zusammenfassung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Gesamtkonzept für die integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material mit dem Ziel vorgestellt, die Ressourceneffizienz entlang des Produktlebenszyklus zu verbessern.

Im Rahmen der Arbeit wurden daher zunächst die für ein tieferes Verständnis der Produktentstehung notwendigen Grundlagen erarbeitet. Im Anschluss erfolgte die Analyse bestehender Konzepte und Ansätze im Stand der Technik. Dabei stellte sich heraus, dass

- unterschiedliche Begriffe zwischen den Fachbereichen (in Bezug auf die Entwicklungsphasen und deren Ergebnisse) existieren, die eine Integration erschweren;
- die integrierte Auswahl von Produkt, Produktion und Material innerhalb der Entwicklung nicht ausreichend berücksichtigt wird;
- die methodische Unterstützung bei der integrierten Bewertung und Auswahl von Kombinationen aus Produkt-, Produktions- und Materiallösung unzureichend ist;
- die ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kriterien nur in wenigen Ausnahmen kombiniert betrachtet werden sowie
- die Einzelwerte aus bestehenden Datenbanken nicht effizient eingebunden werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein integriertes Gesamtkonzept entwickelt, das diese Defizite adressiert. Die Grundlage für einen übergreifenden Entwicklungsprozess bildet eine konsistente Beschreibung der Phasen und Ergebnisse, um mögliche Anknüpfungspunkte zu identifizieren. Darauf aufbauend wurde ein integriertes Prozessmodell zur Definition von Produkt, Produktion und Material vorgestellt. Die Bewertung anhand ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Kriterien und die anschließende Auswahl von potenziellen Lösungen erfolgt gemeinsam in den inte-

grierten Definitionsphasen und bindet etablierte Bewertungsmethoden ein. Die drei Dimensionen Produkt, Produktion und Material in Kombination mit den drei Dimensionen der Bewertungskriterien verdeutlichen die Komplexität der Entscheidungsfindung.

Mithilfe des in der Arbeit vorgestellten integrierten morphologische Kastens können die Bewertungsergebnisse ausgewertet werden. Zur effizienten Nutzung wurde außerdem ein Software-Prototyp vorgestellt, der den Anwender bei konkreten Aufgabenstellungen unterstützt. Durch dieses Vorgehen soll die Ressourceneffizienz erhöht werden.

Der in der Arbeit vorgestellte Ansatz wurde abschließend anhand zweier Beispiele validiert.

8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

In Kapitel 1.2.2 wurden die für diese Arbeit relevanten Forschungsfragen aufgestellt. Diese sollen durch das in Kapitel 6 vorgestellte Gesamtkonzept beantwortet werden. Im Folgenden wird dargestellt, durch welche Elemente die jeweiligen Fragen beantwortet werden.

1. Wie können die Phasen und Ergebnisse der **Produkt-, Produktions- und Materialdefinition einheitlich beschrieben** werden?

Auf Basis der in Kapitel 3 erarbeiteten Grundlagen lassen sich bei den drei Fachbereichen ähnliche Strukturen erkennen. Daher ist eine Einteilung der Entwicklungsphasen in eine Spezifikationsphase, in der die Anforderungen geklärt werden, eine Konzeptphase, in der alternative Konzepte erarbeitet werden, eine Komponenten-/Detailphase, in der die Komponenten, des zuvor ausgewählte Konzept ausgearbeitet werden und eine Systemintegrationsphase, in der die Komponenten schließlich zum finalen System verknüpft werden sinnvoll (siehe Kapitel 6.1).

2. Wie sieht ein **integrierter Produkt-, Produktions- und Materialdefinitionsprozess** aus, der die **Ressourceneffizienz** entlang des Produktlebenszyklus erhöht?

Die integrierte Definition von Produkt, Produktion und Material setzt ein einheitliches Verständnis sowie eine gemeinsame Beschreibung der drei Fachbereiche voraus (Kapitel 6.1). Die fachbereichsinternen Entwicklungsprozesse werden um integrierte Bewertungs- und Auswahlphasen erweitert (Kapitel 6.2). In den jeweiligen Fachbereichen erfolgt die Generierung von alternativen Lösungen zur Erfüllung der spezifischen Funktionen/Eigenschaften. Potenzielle Kombinationen der Ergebnisse werden anschließend in der integrierten Phase anhand ökologischer, aber auch

technischer und wirtschaftlicher Kriterien übergreifend bewertet und eingegrenzt. Die Rangfolge der Kriterien ergibt sich dabei aus der gegebenen Aufgabenstellung. Die Auswahl der eingesetzten Bewertungsmethoden zur Ermittlung der ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Kennwerte ist individuell an das jeweilige Szenario (z.B. Unternehmen) anpassbar.

3. Wie kann eine Erhöhung der **Ressourceneffizienz** in einem integrierten Definitionsprozess **methodisch** unterstützt werden?

Die Bewertung von potenziellen Kombinationen aus Produkt-, Produktions- und Materiallösung anhand ökologischer sowie technischer und wirtschaftlicher Kriterien resultiert in einer mehrdimensionalen Struktur und ist daher sehr komplex (siehe Kapitel 6.3). Der integrierte morphologische Kasten adressiert exakt diese Problemstellung. Die Bewertung der einzelnen Kriterien setzt sich wiederum aus mehreren Teilwerten zusammen. Daher lässt sich die ökologische, technische und wirtschaftliche Wertigkeit einer potenziellen Kombination aus den gewichteten Summen der Ergebnisse, der in Kapitel 6.2 eingesetzten Bewertungsmethoden, ermitteln. Zu den ökologischen Bewertungsverfahren gehören beispielsweise der MIPS, der den biotischen, abiotischen Materialaufwand sowie den Luft- und Wasserverbrauch berücksichtigt oder der Energieverbrauch während der Herstellung. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich die besten Kombinationen entweder grafisch auswählen oder rechnerisch bestimmen. Die Methode sieht vor, dass die Bewertungsmethoden auf das jeweilige Szenario und Unternehmen angepasst werden können.

4. Wie können **IT-Tools** in einer integrierten Definition das Gesamtkonzept zur Steigerung der **Ressourceneffizienz** abbilden?

Aufgrund der hohen Komplexität, die mit dem Umfang der zu lösenden Aufgabenstellung zunimmt, ist eine Unterstützung während des Entwicklungsprozesses in Form einer effizienten Softwarelösung unabdingbar (siehe Kapitel 6.4). Die Vielzahl an potenziellen Kombinationen, verknüpft mit den verschiedenen Kriterien, aus denen sich die Wertigkeiten zusammensetzen, setzt eine automatisierte Aufbereitung bzw. Auswertung voraus. Mithilfe des entwickelten Tools ist es

schließlich möglich, anhand eines grafischen Auswahlfensters die besten Kombinationen bezüglich der ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten sehr effizient zu identifizieren. Außerdem wird dem Nutzer die jeweils beste mögliche Kombination angezeigt.

8.3 Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Gesamtkonzept adressiert die integrierte Entwicklung bzw. Definition von Produkt, Produktion und Material mit dem Ziel, die Ressourceneffizienz entlang des Lebenszyklus zu verbessern. Neben den eingesetzten Ressourcen und den damit verbundenen Umweltauswirkungen (in dieser Arbeit allgemein als ökologische Aspekte angeführt) werden auch technische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt um schließlich konkurrenzfähige Produkte zu entwickeln und das Verhältnis zwischen Ressourceneinsatz und technischem sowie wirtschaftlichem Nutzen zu verbessern.

Das Gesamtkonzept ermöglicht eine parallele Ausführung von Entwicklungsaktivitäten. Die Entwicklung von Lösungen kann hierbei zeitlich parallel in enger Zusammenarbeit durchgeführt werden, wobei die Produktdefinition etwas vorverlagert ist, da die Produktionssystemlösungen und Materiallösungen von den Produktlösungen abhängen. Bestehende Strukturen müssen zwar angepasst werden, können aber weiter bestehen bleiben und werden um die integrierten Definitionsphasen erweitert.

Die integrierte Bewertung und Auswahl betrachtet die in den Fachbereichen erarbeiteten alternativen Lösungen für das Produkt, den Prozess und die Anlage sowie das eingesetzte Material. Um möglichst viele Aspekte abzudecken, setzt sich die Bewertung aus mehreren Kennwerten der ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Bewertungsmethoden zusammen. Der Energieverbrauch der Fertigungstechnologie oder die Ressourcenkritikalität sind beispielsweise Bestandteile der ökologischen Wertigkeit.

Die hier vorgestellten und eingesetzten Bewertungsmethoden mit den daraus resultierenden Kennwerten sind in dieser Arbeit Beispiele für mögliche Bewertungsmethoden, die angepasst oder ergänzt werden können. Je nach Unternehmen stehen verschiedene Ziele und Herausforderungen im Vordergrund. Außerdem gilt es die Datenlage und den Zugriff auf Kennwerte zu berücksichtigen. Auch die Gewichtung der unterschiedlichen Kennwerte ist individuell anpassbar und wird je nach Produkttyp anders wählbar. Mithilfe von Gewichtungsfaktoren kann je nach Ressourceneinsatz der Fokus auf die Herstellungs- oder Nutzungsphase gelegt werden.

Neben den genannten Vorteilen weist das entwickelte Gesamtkonzept auch kleinere Nachteile auf. Der Arbeitsaufwand für die Bewertung ist nicht zu unterschätzen, kann aber durch den daraus resultierenden geringeren Aufwand für Änderungen aufgrund reiferer Lösungen kompensiert werden. Zur effizienten Nutzung sollten dem Anwender außerdem Datenbanken zur Verfügung stehen, die nicht jedes Arbeitsumfeld zu bieten hat. Das manuelle Recherchieren der Werte ist ebenso möglich, aber auch sehr zeitintensiv.

Anhand der Validierungsbeispiele konnte gezeigt werden, dass sich der Ansatz prinzipiell auf konkrete Aufgabenstellungen aus der Industrie anwenden lässt. Nach dem Fazit der vorgestellten Arbeit wird im Folgenden ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit nur die Fertigung adressiert wurde, sind Betrachtungen bezüglich der Montage für die Herstellung relevant. Bei der Konzeption der Montageprozesse gilt es zu analysieren, welche Wirkprinzipien separat hergestellt und später zusammengefügt werden, welche Wirkprinzipien in einem Bauteil realisiert werden können und welche Wirkprinzipien mehrere Bauteile erfordern. Durch weitere Arbeiten in diesem Bereich ließen sich auch Montageaspekte in das hier vorgestellte Gesamtkonzept integrieren.

In der derzeitigen Ausführung werden beim integrierten morphologischen Kasten Werte und keine Wertebereiche verwendet. Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten bei den Eingangsdaten erfordern daher anderweitige Kompensationsmöglichkeiten, wie das Arbeiten mit Lösungsmengen (Set-Based Concurrent Engineering, siehe Kapitel 4.1). Die Verwendung von Wertebereichen ist jedoch ein interessanter Ansatzpunkt, um die Unsicherheiten oder Ungenauigkeiten zu visualisieren. Diese Wertebereiche könnten innerhalb der Software nicht mehr als Punkte, sondern als Blasen abgebildet werden.

Um die Datenbeschaffung zu erleichtern, ist der Aufbau einer eigenen Datenbank sinnvoll. Dort können nicht nur Einzelwerte für Materialien, Technologien usw., sondern auch die Bewertung vollständiger Kombinationen hinterlegt werden.

Insgesamt liefert diese Arbeit ein vielversprechendes Gesamtkonzept, um die Ressourceneffizienz durch die übergreifende Definition von Produkt, Produktion und Material in Kombination mit einer mehrdimensionalen, integrierten Bewertung und Auswahl von alternativen Lösungen zu verbessern. Mithilfe der präsentierten Vorgehensweise ist es möglich, besser auf die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der weltweiten Ressourcensituation zu reagieren und einen Beitrag zur Reduzierung, der durch den Ressourceneinsatz bedingten Umweltauswirkungen zu leisten.

9 Literaturverzeichnis

- [ABCS04] Ashby, M. F.; Bréchet, Y. J. M.; Cebon, D.; Salvo, L. (2004): Selection strategies for materials and processes. In: Materials & Design 25 (1), S. 51-67.
- [Aggt87] Aggteleky, B. (1987): Grundlagen - Zielplanung - Vorarbeiten. Unternehmerische und systemtechnische Aspekte, Marketing und Fabrikplanung. 2. Aufl. München [u.a.]: Hanser (Fabrikplanung, 1).
- [Akao90] Akao, Y. (1990): Quality function deployment. Integrating customer requirements into product design. New York: Productivity Press.
- [AnHe00] Myrup Andreassen, M.; Hein, L. (2000): Integrated Product Development. Copenhagen.
- [AsCB16] Ashby, M. F.; Coral, J. S.; Balas, D. F. (2016): Materials and sustainable development. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- [Ashb05] Ashby, M. F. (2005): Materials selection in mechanical design. 3. Aufl. Amsterdam, Boston: Butterworth-Heinemann.
- [Ashb13] Ashby, M. F. (2013): Materials and the environment. Eco-informed material choice. 2. Aufl. Waltham (Mass.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [Bell98] Bellgran, M. (1998): Systematic design of assembly systems. Preconditions and design process planning. Linköping: Assembly Technology, Department of Mechanical engineering, Linköping University (Linköping studies in science and technology, 515).
- [Bend11] Benders, M. J. (2011): Methodik der kombinierten Werkstoff-, Fertigungsverfahren- und Geometriesynthese. Aachen: Shaker (Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, 12).
- [Bern98] Bernstein, J. I. (1998): Design Methods in the Aerospace Industry: Looking for Evidence of Set-Based Practices Set-Based Practices. Masterthesis. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- [BeSä10] Bellgran, M.; Säfsen, K. (2010): Production development. Design and operation of production systems. London: Springer.
- [BGG12] Brökelmann, J.; Gausemeier, P.; Gausemeier, J.; Seliger, G. (2012): A Method for an Integrated Development of Product-Production System Combinations.

- In: Günther Seliger (Hg.): Sustainable manufacturing. Shaping global value creation. Berlin, New York: Springer (EcoProduction), S. 71-75.
- [BKWM05] Brecher, C.; Klocke, F.; Weck, M.; Meidlinger, R.; Wegner, H. (2005): Integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung. Bewertung von Fertigungsfolgen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [BMWi10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit (2010): Energiekonzept. für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 28.09.2010.
- [BMWi15] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015): Ein gutes Stück Arbeit Die Energie der Zukunft. Vierter Monitoring-Bericht zur Energiewende, November 2015.
- [BMWi16] BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): Energiedaten: Gesamtausgabe, Mai 2016.
- [BoDG13] Boppert, J.; Durchholz, J.; Günthner, W. A. (2013): Lean Logistics im Wandel - neue Aufgaben, Partner und Rahmenbedingungen. In: Günthner, W.A.; Boppert, J. (Hg.): Lean Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 27-33.
- [BoDK02] Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W. A. (2002): Product design for manufacture and assembly. 2. Aufl. New York: M. Dekker (Manufacturing engineering and materials processing, 58).
- [Boss07] Bossmann, M. (2007): Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung. [Online-Ausg.]. Saarbrücken: LFT, Univ. (Schriftenreihe Produktionstechnik, 38).
- [Bran14] Brandis, R. (2014): Systematik für die integrative Konzipierung der Montage auf Basis der Prinzipiellösung mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI (HNI-Verlagsschriftenreihe, 325).
- [BrWB05] Brecher, C.; Weck, M.; Bungert, F. (2005): Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung. Bereichsübergreifende Produktdefinition. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [BrWG09] Bracht, U.; Wenzel, S.; Geckler, D. (2009): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Heidelberg [u.a.]: Springer.

- [Buck84] Buckley, J. J. (1984): The multiple judge, multiple criteria ranking problem: A fuzzy set approach. In: *Fuzzy Sets and Systems* 13 (1), S. 25-37.
- [Bull86] Bullinger, H.-J. (Hg.) (1986): *Systematische Montageplanung. Handbuch für d. Praxis.* München, Wien: Hanser.
- [CACT13] Chapman, A.; Arendorf, J.; Castella, T.; Thompson, P.; Willis, P.; Espinoza, L. T. et al. (2013): *Study on Critical Raw Materials at EU Level. Final Report.*
- [CADL01] Cochran, D. S.; Arinez, J. F.; Duda, J. W.; Linck, J. (2001): A decomposition approach for manufacturing system design. In: *Journal of Manufacturing Systems* 20 (6), S. 371-389.
- [CIRP90] CIRP (1990): *Nomenclature and Definitions for Manufacturing Systems. (English Version).* In: *CIRP Technical Report 1990* (39/2), S. 735-742.
- [Coch99] Cochran, D. S. (1999): *The Production System Design and Deployment Framework.* In: *International Automotive Manufacturing Conference & Exposition, MAY. 10, 1999: SAE International* 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series).
- [Ditt12] Dittrich, M. (2012): *Green economies around the world? Implications of resource use for development and the environment.* Wien: Sustainable Europe Research Inst. (SERI).
- [DZBW06] Deubel, T.; Zenner, C.; Bley, H.; Weber, C. (2006): *Adaptation of a new Design Method for the Requirement-Driven Planning of Manufacturing Systems.* In: Xue, D.; Ramirez-Serrano, A.; Park, S.; Fletcher, D.; Gu, P. (Hg.): *Design & Innovation for a Sustainable Society. The 16th CIRP International Design Seminar. International Design Seminar.* Kananaskis, Alberta, Canada, 16-19.07. University of Calgary, S. 529-534.
- [EBGK97] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Gräßler, R.; Kälscheid, W. (1997): *Simultaneous engineering approach to an integrated design and process planning.* In: *European Journal of Operational Research* 1997 (100), S. 327-337.
- [EG2009] Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG.

- [Ehrl09] Ehrlenspiel, K. (2009): Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Aufl. München, Wien: Hanser.
- [EiSt08] Eigner, M.; Stelzer R. (2008): Product lifecycle management. London: Springer.
- [EKLM14] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M. (2014): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [EKSK05] Eversheim, W.; Klocke, F.; Schuh, W.; Knoche, K.; Willms, H. (2005): Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung. Einsatzplanung von Fertigungstechnologien. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [ELPS05] Eversheim, W.; Luczak, H.; Pfeifer, H.; Schuh, G.; Kabel, T.; Kubosch, A. et al. (2005): Organisation und Informationsmanagement. Management integrierter Produktentstehungen. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [EsAs99] Esawi, A. M. K.; Ashby, M. F. (1999): Cost-Based Ranking for Manufacturing Process Selection. In: Jean-Louis Batoz, Patrick Chedmail, Gerard Cognet und Clément Fortin (Hg.): Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering '98. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 603-610.
- [EuCo14] European Commission (2014): Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials (Ref. Ares (2015)1819503 - 29/04/2015).
- [EvBL95] Eversheim, W.; Bochtler, W.; Laufenberg, L. (1995): Simultaneous engineering. Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie. Berlin, New York: Springer.
- [Ever02] Eversheim, W. (2002): Organisation in der Produktionstechnik. 4. Aufl. Berlin: Springer (VDI).
- [EvSA05] Eversheim, W.; Schuh, G.; Assmus, D. (2005): Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [Fall00] Fallböhrer, M. (2000): Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2000, 23).

- [Fara14] Farag, M. M. (2014): Materials and process selection for engineering design. Third edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- [FCHH12] Foth, H.; Calliess, C.; Hohmeyer, O.; Holm-Müller, K.; Niekisch, M.; Schreurs, M.; Faulstich, M. (2012): Verantwortung in einer begrenzten Welt. Juni 2012. Berlin: E. Schmidt (Umweltgutachten, 2012).
- [GaBK10] Gausemeier, J.; Brandis, R.; Kaiser, L. (2010): Auswahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption. In: J. Gausemeier, F. Ramming, W. Schäfer und A. Trächtler (Hg.): 7. Paderborner Workshop - Entwurf mechatronischer Systeme, 18.-19.03.2010. Heinz Nixdorf Institut. Paderborn.
- [GaBR10] Gausemeier, J.; Brandis, R.; Reyes-Perez, M. (2010): A Specification Technique for the integrative conceptual design of mechatronic products and production systems. In: Marjanović, D. (Hg.): Design 2010. 11th International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010. Zagreb, S. 711-722.
- [GaPl14] Gausemeier, J.; Plass, C. (2014): Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Aufl. München: Hanser.
- [GDKN11] Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Kahl, S.; Nordsiek, D. (2011): Integrative development of product and production system for mechatronic products. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 (4), S. 772-778.
- [GFDK09] Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S. (2009): Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems. In: Res Eng Design 20 (4), S. 201-223.
- [GLRW00] Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P (2000): Kooperatives Produktengineering. Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmässigen Wirkens. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. (HNI-Verlagsschriftenreihe, 79).
- [GoSp01] Goedkoop, M.; Spriensma, R. (2001): The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Annex report, 22.06.2001.
- [Gran15] CES 2015 SELECTOR (2015): Granta. Online verfügbar unter <http://www.grantadesign.com/products/ces/>.
- [GuRT01] Gu, P.; Rao, H.A; Tseng, M.M (2001): Systematic Design of Manufacturing Systems Based on Axiomatic Design Approach. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 50 (1), S. 299-304.

- [Gute79] Gutenberg, E. (1979-1980): Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Berlin [u.a.]: Springer-Verlag (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft. Abteilung Staatswissenschaft).
- [HaCl88] Hauser, J. R.; Clausing, D. (1988): The House of Quality. In: Harvard Business Review Mai 1988, S. 63-73.
- [HaHo10] Hachtel, G.; Holzbaur, U. D. (2010): Management für Ingenieure. Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik; mit 73 Tabellen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).
- [Helb10] Helbing, K. W. (2010): Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [HoJS13] Hottenroth, H.; Joa, B.; Schmidt, M. (2013): Carbon Footprints für Produkte. Handbuch für die betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen. Institute for Industrial Ecology Pforzheim.
- [Hsu16] Hsu, A.; et al. (2016): Environmental Performance Index. New Haven. Online verfügbar unter www.epi-yale.edu.
- [HuEd88] Hubka, V.; Eder, W. E. (1988): Theory of Technical Systems. A Total Concept Theory for Engineering Design. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Huy13] Huy, D. et al. (2013): Deutschland - Rohstoffsituation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover.
- [ILO12] International Labour Organization (2012): From precarious work to decent work. Outcome document to the workers' symposium on policies and regulations to combat precarious employment. Geneva: ILO.
- [Jäge91] Jäger, A. (1991): Systematische Planung komplexer Produktionssysteme. Berlin, New York: Springer (IWB Forschungsberichte, 31).
- [JaVa14] Jackstien, K.; Vajna, S. (2014): Grundlagen des Integrated Design Engineering. In: Vajna, S. (Hg.): Integrated Design Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 51-93.
- [KeSG84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R. (1984): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Hanser.
- [KGEE09] Krausmann, F.; Gingrich, S.; Eisenmenger, N.; Erb, K. H.; Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M. (2009): Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. In: Ecological Economics (Vol. 68 (10)), S. 2696-2705.

- [KKHG12] Kosmo, J.; Kanthak, J.; Herrmann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U. (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Umweltbundesamt Januar 2012.
- [Kohl05] Kohlhoff, S. (2005): Produktentwicklung mit SAP in der Automobilindustrie. 1. Aufl. Bonn: Galileo Press (SAP Press).
- [Malm97] Malmqvist, J. (1997): Improved Function-means Trees by Inclusion of Design History Information. In: Journal of Engineering Design 8 (2), S. 107-117.
- [Matt02] Matthiesen, S. (2002): Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme. Dissertation. TH Karlsruhe, Karlsruhe. Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau.
- [Meie03] Meierlohr, C. (2003): Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung. München: H. Utz (Forschungsberichte IWB, 182).
- [MiJE15] Michaelis, M. T.; Johannesson, H.; ElMaraghy, H. A. (2015): Function and process modeling for integrated product and manufacturing system platforms. In: Journal of Manufacturing Systems 36, S. 203-215.
- [Mild10] Mildner, S.-A. (2010): Konkurrenz um knappe Ressourcen. Projektpapier. Stiftung Wissenschaft und Politik.
- [Min75] Minolla, W. (1975): Rationalisierung in der Arbeitsplanung. Schwerpunkt Organisation. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen.
- [MüLa11] Müller-Langer, F. (2011): Analyse und Bewertung ausgewählter zukünftiger Biokraftstoffoptionen auf der Basis fester Biomasse. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg.
- [Müll08] Müller, S. (2008): Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. München: Utz (IWB Forschungsberichte, 209).
- [Nord12] Nordsiek, D. (2012): Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinzipiösung mechatronischer Systeme. Paderborn: HNI (HNI-Verlagsschriftenreihe, 304).
- [Norr01] Norris, G. A. (2001): Integrating life cycle cost analysis and LCA. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 6 (2), S. 118-120.

- [Ondr79] Ondracek, G. (1979): Werkstoffkunde. Leitfaden für Studium + Praxis: (Aufbau - Eigenschaften - Technologie - Prüfung - Untersuchung). Grafenau: expert-Verlag; Berlin: VDE-Verlag.
- [PaMa13] Pape, D.; Mantwill, F. (2013): Frühzeitige energetische Produktbeeinflussung durch Nutzung von Kausalverkettungen im Automobilbau. In: Reimund Neugebauer, Uwe Götze und Welf-Guntram Drossel (Hg.): Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme - Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD. Auerbach: Wissenschaftliche Scripten, S. 215-229.
- [PBFG06] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H (2006): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin: Springer.
- [PfCa05] Pfeifer, T.; Canales, C. (2005): Integrierte Produktdefinition und Technologieplanung. Integrative Qualitätsplanungssystematik. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hg.) - Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer.
- [Pogg11] Poggensee, K. (2011): Investitionsrechnung. Grundlagen - Aufgaben - Lösungen. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- [PoLi08] Ponn, J.; Lindemann, U. (2008): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Optimierte Produkte--systematisch von Anforderungen zu Konzepten. Berlin: Springer (VDI).
- [Pras00] Prasad, B. (2000): A concurrent function deployment technique for a workgroup-based engineering design process. In: Journal of Engineering Design 11 (2), S. 103-119.
- [Pras96] Prasad, B. (1996): Concurrent Function Deployment - An Emerging Alternative to QFD: Conceptual Framework. In: Fox, M.; Sobolewski, M. (Hg.): Advances in concurrent engineering. Collaborative work, organization and management ...; presented at Third ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Toronto, Ontario, Canada, August 26 - 28, 1996. Lancaster, Pa. [u.a.]: Technomic Publ. Co, S. 105-112.
- [Pras97] Prasad, B. (1997): Concurrent engineering fundamentals Vol. 2. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall (Prentice Hall International series in Industrial and Systems Engineering).

- [REFA90] REFA (1990): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl., 6. München: Hanser.
- [Regi17] Regitz, M. (2017): Mehrdimensionale Lösungsbewertung im Rahmen der integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung. Masterarbeit. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
- [Reye10] Reyes-Pérez, M. (2010): A specification technique for the conceptual design of manufacturing systems. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn. Heinz Nixdorf Institut.
- [SBFV15] Stoffels, P.; Bähre, D.; Frey, G.; Vielhaber, M. (2015): Energy Efficiency Engineering-Towards an Integrated Method Framework for Energy-Oriented Product and Production Development. In: Oral, A.Y. et al. (Hg.): 2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014). Cham: Springer International Publishing (Springer Proceedings in Energy), S. 291-297.
- [ScAp14] Schäfer, P.; Apostolov, H. (2014): Nachhaltige Produktentwicklung. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Radoslav Z. (Hg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 369-392.
- [SCAS16] Steimer, C.; Cadet, M.; Aurich, J. C.; Stephan, N. (2016): Approach for an Integrated Planning of Manufacturing Systems Based on Early Phases of Product Development. In: Procedia CIRP 57, S. 467-472.
- [Schm17] Schmidt, P. (2017): Integrierte Produkt-, Prozess- und Materialauswahl in der Komponentenentwicklung am Beispiel eines Stoßdämpfers. Masterseminar. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
- [Schm97] Schmidt-Bleek, F. (1997): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Faktor 10 - das Mass für ökologisches Wirtschaften. Im Text ungekürzte Ausg. München: Dt. Taschenbuch-Verlag.
- [Scho12] Scholze-Stubenrecht, W. (2012): Duden, die deutsche Rechtschreibung. [das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln; rund 135000 Stichwörter mit über 500000 Beispielen, Bedeutungserklärungen und Angaben zu Worttrennung, Aussprache, Grammatik, Stilebenen und Etymologie]. 25. Aufl. Mannheim [u.a.]: Dudenverl. (Der Duden in zwölf Bänden, 1).

- [SKBV17a] Stoffels, P.; Kaspar, J.; Baehre, D.; Vielhaber, M. (2017): Holistic Material Selection Approach for More Sustainable Products. In: *Procedia Manufacturing* 8, S. 401-408.
- [SKBV17b] Stoffels, P.; Kaspar, J.; Baehre, D.; Vielhaber, M. (2017): Integrated Product and Production Engineering Approach – A Tool-Based Method for a Holistic Sustainable Design, Process and Material Selection. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing GCSM 2017, Haifa, Israel. – Beitrag angenommen.
- [SLGV14] Stoffels, P.; Litwa, F.; Gerlach, C.; Vielhaber, M. (2014): Integration Framework for Product Development and Production Development. In: Laakso, M.; Ekman, K. (Hg.): *Proceedings of NordDesign 2014 Conference*. [in Espoo, Finland on 27 - 29 August 2014]. Aalto: Aalto Design Factory Aalto University, S. 744-753.
- [SoWL99] Sobek, D. K.; Ward A. C.; Liker J. K. (1999): Toyota's principles of set-based concurrent engineering. In: *Sloan management review* Winter 1999 (40(2)), S. 67-83.
- [Spur94] Günter, S. (1994): *Handbuch der Fertigungstechnik*. München, Wien: Hanser.
- [StAu16] Steimer, C.; Aurich, J. C. (2016): Analysis of Information Interdependencies Between Product Development and Manufacturing System Planning in Early Design Phases. In: *Procedia CIRP* 50, S. 460-465.
- [StVi15] Stoffels, P.; Vielhaber, M. (2015): Methodical Support for Concurrent Engineering across Product and Production (System) Development. In: Weber, C.; Husung, S.; Cascini, G.; Cantamessa, M.; Marjanović, D. (Hg.): *The 20th International Conference on Engineering Design (ICED15)*. 27th-30th July 2015, Politecnico di Milano, Italy: *proceedings of ICED15 (Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design)*, S. 155-162.
- [StVi16a] Stoffels, P.; Vielhaber, M. (2016): Decision Support for Energy Efficient Production in Product and Production Development. In: *Procedia CIRP* 40, S. 530-535.
- [StVi16b] Stoffels, P.; Vielhaber, M. (2016): Integrated development process of products and production systems. In: Boks, C. (Hg.): *Proceedings of NordDesign*

2016. August 10-12, 2016, Trondheim, Norway. Bristol, United Kingdom: The Design Society, S. 370-380.
- [SuCL98] Suh, N. P.; Cochran, D. S.; Lima, P. C. (1998): Manufacturing System Design. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 47 (2), S. 627-639.
- [Suh90] Suh, N. P. (1990): The principles of design. New York: Oxford University Press.
- [Suh95] Suh, N. P. (1995): Design and operation of large systems. In: Journal of Manufacturing Systems 14 (3), S. 203-213.
- [Suh98] Suh, N. P. (1998): Axiomatic Design Theory for Systems. In: Research in Engineering Design 10 (4), S. 189-209.
- [Swat15] Swat, M. (2015): Methode zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Prozessketten für die Serienfertigung am Beispiel ausgewählter Feinbearbeitungsverfahren. Dissertation. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik (Schriftenreihe Produktionstechnik, 53).
- [SwBo03] Swift, K. G.; Booker, J. D. (2003): Process selection. From design to manufacture. 2. Aufl. Oxford [England], Boston: Butterworth-Heinemann.
- [Trom01] Trommer, G. (2001): Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Produktionstechnik, Bd. 2001,15).
- [Tros98] Trossmann, E. (1998): Investition. Stuttgart: Lucius und Lucius (Grundwissen der Ökonomik / Betriebswirtschaftslehre, 2013).
- [UIEp08] Ulrich, K. T.; Eppinger, S. D. (2008): Product design and development. 4. ed., internat. Boston: McGraw-Hill/Irwin.
- [UN15a] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015): World Population Prospects: The 2015 Revision, World Population 2015 Wallchart. ST/ESA/SER.A/378.
- [UN15b] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015): World Population Prospects: The 2015 Revision, DVD Edition.
- [UNDG13] United Nations Development Group (2013): Natural Resource Management in Transition Settings. UNDG – ECHA Guidance Note, Januar 2013.
- [UNEP12] UNEP (2012): The global outlook on SCP policies. Taking action together. Paris: UNEP DTIE.

- [USCH10] United States, Congress, House (2010): Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act.
- [USGS16] U.S. Geological Survey, (2016): Mineral commodity summaries 2016.
- [VaBu14] Vajna, S.; Burchardt, C. (2014): Modelle und Vorgehensweisen der Integrierten Produktentwicklung. In: Vajna, S. (Hg.): Integrated Design Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3-50.
- [Viel05] Vielhaber, M. (2005): Assembly oriented design. Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Schriftenreihe Produktionstechnik, 34).
- [ViSt14] Vielhaber, M.; Stoffels, P. (2014): Product Development vs. Production Development. In: 24th CIRP Design Conference 2014, S. Paper ID PROCIR-D-13-00192.
- [VoON03] van der Voet, E.; van Oers, L.; Nikolic, I. (2003): Dematerialisation: not just a matter of weight. Development and application of a methodology to rank materials based on their environmental impacts. Leiden: Centre of Environmental Science, Leiden University (CML rapport Section Substances & Products, 160).
- [WaSe89a] Ward, A. C.; Seering, W. (1989): Quantitative Interference in a Mechanical Design Compiler. In: Elmaraghy, W. H.; Seering, W. P.; Ullman, D. G. (Hg.): Design theory and methodology, DTM '89. Presented at the 1989 ASME Design Technical Conferences, 1st International Conference on Design Theory and Methodology, Montreal, Quebec, Canada, September 17-21, 1989. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, S. 89-97.
- [WaSe89b] Ward, A. C.; Seering, W. (1989): The Performance of a Mechanical Design Compiler. In: Proceedings of the International Conference on Engineering design. Bury St Edmunds: Mechanical Engineering Publ.
- [Webe05] Weber, C. (2005): An Extended Theoretical Approach to Modelling Products and Product Development Processes. In: Bley, H.; Janssen, H.; Shpitalni M.; Krause, F.-L. (Hg.): Proceedings of the 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes.

- 2nd German-Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes. Berlin, 07-08.07.2005. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, S. 159-179.
- [Webe96] Weber, H.-J. (1996): Produktionssysteme. In: Kern, W. (Hg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, 7), S. 1596-1604.
- [WELR11] Wittmer, D.; Erren, M.; Lauwig, C.; Ritthoff, M.; Dressler, C. (2011): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Meilensteinbericht des Arbeitsschrittes 2.1 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal.
- [Weya10] Weyand, L. (2010): Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik (Schriftenreihe Produktionstechnik, 46).
- [WhCl92] Wheelwright, S. C.; Clark, K. B. (1992): Revolutionizing product development. Quantum leaps in speed, efficiency, and quality. New York, Toronto, New York: Free Press, Maxwell Macmillan Canada, Maxwell Macmillan International.
- [WiRN14] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P. (2014): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl. München: Hanser.
- [WLSC94] Ward, A. C.; Liker, J. K.; Sobek D. K.; Cristiano, J. J. (1994): Set-Based Concurrent Engineering and Toyota. In: Proceedings of the ASME DTM. New York, S. 79-90.
- [WPBS88] Winner, R. I.; Pennell, J. P.; Bertrand, H. E.; Slusarezuk, M. M. G. (1988): The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition. Alexandria, VA.
- [Wu94] Wu, B. (1994): Manufacturing systems design and analysis. Context and techniques. 2. Aufl. London: Chapman & Hall.
- [Wupp14] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (2014): Materialintensität von Materialien, Energieträgern, Transportleistungen, Lebensmitteln, 03.02.2014.

- [Zang14] Zangemeister, C. (2014): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 5. Auflage 2014 (erweitert). Winnemark: Zangemeister & Partner.
- [Zehb96] Zehbold, C. (1996): Lebenszykluskostenrechnung. Wiesbaden: Gabler (Krp-Edition).
- [Zenn06] Zenner, C. (2006): Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung. Saarbrücken: Univ. des Saarlandes, Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM (Schriftenreihe Produktionstechnik, 37).
- [ZhZh95] Zhang, H. C.; Zhang, D. (1995): Concurrent Engineering: An Overview from Manufacturing Engineering Perspectives. In: Concurrent Engineering 3 (3), S. 221-236.
- [ZiGu91] Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991): Multi-criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin [etc.]: Springer-Verl (Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften).
- [Zwic89] Zwicky, F. (1989): Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild. [2. Aufl. 1989 Reprint]. Glarus: Baeschlin (Schriftenreihe der Fritz-Zwicky-Stiftung, 5).

Normen

- [DIN8550] DIN 8580, 2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag.
- [ISO14001] Deutsche Norm DIN EN ISO 14001, 2015-11: Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Berlin: Beuth Verlag.
- [ISO14040] Deutsche Norm DIN EN ISO 14040, 2009-11: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI2206] VDI-Richtlinie 2206, 2004-06: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI2221] VDI-Richtlinie VDI 2221, 1993-05: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI2225] VDI-Richtlinie VDI 2225, 1997-11: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI4499] VDI-Richtlinie VDI 4499, 2008-02: Digitale Fabrik. Berlin: Beuth Verlag.

- [VDI4600] VDI-Richtlinie VDI 4600, 1997-06: Kumulierter Energieaufwand. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI4800] VDI-Richtlinie VDI 4800, 2016-03: Ressourceneffizienz. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI5200] VDI-Richtlinie VDI 5200, 2011-02: Fabrikplanung. Berlin: Beuth Verlag.

Internetquellen

- [www1] WU (2014): Global Material Flows Database. <http://www.materialflows.net/materialflowsnet/data/data-download/> [Stand: 06.10.2017]
- [www2] <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/tablebrowser/> [Stand: 06.10.2017]
- [www3] <http://www.dfma.com/software/dfma.asp> [Stand: 06.10.2017]
- [www4] <https://www.grantadesign.com/DE/products/ces/> [Stand: 06.10.2017]
- [www5] <https://www.lme.com/en-gb/pricing-and-data/pricing/official-price/> [Stand: 06.10.2017]
- [www6] <http://www.ptonline.com/> [Stand: 06.10.2017]
- [www7] <http://www.worldbank.org/> [Stand: 06.10.2017]
- [www8] <http://www.gabi-software.com/deutsch/software/gabi-software/> [Stand: 06.10.2017]
- [www9] <https://simapro.com/about/> [Stand: 06.10.2017]
- [www10] <http://www.ecoinvent.org/database/database.html> [Stand: 06.10.2017]
- [www11] <http://www.eclass-cdp.com/portal/info.seam> [Stand: 06.10.2017]
- [www12] <http://www.duden.de/rechtschreibung/Loesung> [Stand: 06.10.2017]

10 Glossar

Arbeitsplanung

Die **Arbeitsplanung** umfasst nach Eversheim „[...] alle einmaligen auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses sichern“ [Ever02].

Betriebsmittel

Betriebsmittel ist der Oberbegriff für alle technischen Apparaturen die in Unternehmen eingesetzt werden um Produkte oder Dienstleistungen herzustellen. [Gute79]

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe **Produktionskomponente** oder **Anlage** als Synonyme verwendet.

Concurrent Engineering

Nach Winner et al. ist **Concurrent Engineering** eine systematische Vorgehensweise zur integrierten, gleichzeitigen Entwicklung von Produkten und den damit einhergehenden Prozessen wie Herstellung und Support. Der Entwickler berücksichtigt dabei alle Phasen des Produktlebenszyklus – von der Konzeption bis hin zur Entsorgung und Aspekte wie Qualität, Kosten, Zeitplan und Nutzeranforderungen. [WPBS88]

Fabrikplanung

Die **Fabrikplanung** ist nach der VDI-Richtlinie 5200 ein „Systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ [VDI5200].

Fertigung	Die Fertigung (Herstellung) umfasst nach Hachtel und Holzbauren „[...] unmittelbaren Herstellungsprozess mit Teilefertigung und Montage“ [HaHo10]. Fertigung wird im Rahmen dieser Arbeit als Synonym für die Teilefertigung verwendet.
Fertigungsverfahren/ Technologie	Unter Fertigungsverfahren werden alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten, festen Körpern verstanden [DIN8580]. In dieser Arbeit wird der Begriff Technologie in Anlehnung an [Fall00] als Synonym verwendet.
Integrierte Produkt-, Produktions- und Mate- rialdefinition	Integrierte Produkt-, Produktions- und Materialdefinition bedeutet in dieser Arbeit die übergreifende Entwicklung des Produkts, dem dazugehörigen Produktionssystem und den eingesetzten Materialien, in der die Merkmale der drei Systeme gemeinsam festgelegt werden.
Integrierte Produktent- wicklung	Vajna und Burchardt verstehen unter der Integrierten Produktentwicklung „Die integrierte Anwendung von ganzheitlichen und multidisziplinären Methoden, Verfahren, Organisationsformen sowie manueller und rechnerunterstützter Werkzeuge unter minimierter und nachhaltiger Nutzung von Produktionsfaktoren und Ressourcen. Die IPE umfasst alle Schritte von der Idee bis zur Serienfreigabe/Markteinführung eines Produktes oder einer Dienstleistung“ [VaBu14].
Konzept	Laut Duden beschreibt der Begriff Konzept einen Entwurf, eine erste Fassung bzw. einen groben Plan [Scho12]. Im Rahmen dieser Arbeit, wird je nach Fachbereich unter dem Konzept eine Kombination aus Wirkprinzipien, Technologien oder Materialsubklassen verstanden.

Lösung	Der Begriff Lösung wird allgemein als durch die Anwendung spezieller Kenntnisse und Methoden ermitteltes Ergebnis, Verfahren, Vorgehen zur Bewältigung einer Schwierigkeit verstanden [www12]. Als Lösung werden in dieser Arbeit die Ergebnisse bezeichnet, die die Funktionen des Produktes, der Produktion oder die Eigenschaften des Materials erfüllen. Je nach Phase sind das Wirkprinzipien, Technologien und Materialsubklassen (Konzeptphase) oder Komponenten, Anlagen und Materialien (Komponentenphase).
Material	Material ist ein Sammelbegriff für ein „Stoff oder Stoffgemisch, der oder das für die Herstellung von Produkten bestimmt ist. Dies umfasst sowohl Rohstoffe als auch höher verarbeitete Stoffe und Stoffgemische“ [KKHG12]. In dieser Arbeit wird der Begriff Material jedoch aufgrund der angelsächsischen Definition als Äquivalent für Werkstoff verwendet.
Materialauswahl/ Materialdefinition	Die Materialauswahl ist der Sammelbegriff für die Tätigkeiten die erforderlich sind um ausgehend von den Anforderungen an das Material und der Identifikation der notwendigen Eigenschaften, die für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Materialien zu definieren [Ashb05]. In dieser Arbeit wird der Begriff Materialdefinition als Synonym zu Materialauswahl verwendet.
Materialplanung	Materialplanung wird in dieser Arbeit als eine der Materialauswahl vorangestellte Planungsphase verstanden, in der Wettbewerber, die Märkte sowie verfügbare Technologien analysiert werden.
Physikalischer Effekt	Physikalische Effekte beschreiben den Zusammenhang zwischen verschiedenen physikalischen Größen (z.B. Reibkraft) und Gesetze. [PBFG06]

Prinzipielle Lösung/Lösungsprinzip	Eine Prinzipielle Lösung , oder auch Wirkstruktur setzt sich aus der Kombination verschiedener Wirkprinzipien zusammen. [PBFG06]
Produkt	Die VDI-Richtlinie 2221 definiert ein Produkt als „Erzeugnis, das als Ergebnis des Entwickelns und Konstruierens hergestellt oder angewendet wird“ [VDI 2221].
Produktentstehung	Die Produktentstehung ist nach Ehrlenspiel die Gesamtheit aller Prozesse, die notwendig sind, um ein Produkt ausgehend von der Produktplanung bis hin zur Produktnutzung zu realisieren [Ehrl09].
Produktentwicklung/ Produktdefinition	<p>Die Produktentwicklung stellt neben verschiedenen anderen Phasen die essentielle Phase einer Produktentstehung dar [Ehrl09]. Sie beschreibt alle Tätigkeiten, die ausgehend von der Aufgabenstellung zur Fertigstellung der Produktdokumentation führen [VDI2221]. Ulrich und Eppinger erweitern diesen Umfang und definieren die Produktentwicklung als Summe aller Aktivitäten, die nötig sind, um ein Produkt ausgehend von der Marktanalyse an den Kunden zu liefern [UIEp08].</p> <p>Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Produktdefinition im Sinne einer einheitlichen Beschreibung als Synonym zu Produktentwicklung verwendet.</p>
Produktfunktion	Pahl/Beitz versteht unter Produktfunktion „[...] den gewollten Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen“ [PBFG06].

Produktion	Der Begriff Produktion (engl. Manufacturing Production, Abk.: Production) leitet sich aus dem lateinischen Wort „producere“ (etwas hervorbringen bzw. erzeugen) ab und bedeutet die physische Herstellung von Produkten aus ihren Materialbestandteilen [CIRP90]. Jackstien und Vajna erweitern diese Definition und sehen die Produktion als „Phase der Materialisierung des in der Produktentwicklung entstandenen Produkts anhand seiner Dokumente zu Herstellung, Nutzung und Verwertung“ [JaVa14]. Sie beinhaltet die Fertigungssteuerung, Materialwirtschaft, Fertigung, Logistik und Distribution [JaVa14].
Produktionsdefinition	Die Produktionsdefinition umfasst alle Aktivitäten ausgehend von den Spezifikationen an das Produktionssystem bis hin zur Dokumentation der verschiedenen Anlagen und Prozesse. Dabei stehen vor allem die technischen Aspekte Prozess und Anlage und deren Entwicklung im Fokus der Betrachtungen.
Produktionsfunktionen	Unter Produktionsfunktionen versteht Wu alle erforderlichen Operationen, die zur Herstellung eines Teils erforderlich sind [Wu94]. Reyes-Peréz betrachtet die Hauptgruppen und Gruppen der DIN 8580 [DIN8580] als Produktionsfunktionen [Reye10]. Wiendahl et al. sprechen im Rahmen der Technologieplanung von der Festlegung von Fertigungs-, Montage- und Logistikfunktionen. [WiRN14]
Funktion	Nach Ponn und Lindemann ist eine Funktion allgemein „[...] eine am Zweck orientierte, lösungsneutrale, als Operation beschriebene Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems. Funktionen werden durch Kombination eines Substantivs mit einem Verb beschrieben“ [PoLi08].

Produktionssystem	<p>In [REFA90] werden komplexe Produktionssysteme als „[...] Produktionseinrichtungen, bei denen mehrere sich ergänzende Einzel-funktionen, sowohl Bearbeitung und Montage als auch Material- und Informationsfluss, weitgehend selbsttätig ablaufen“ [REFA90], definiert. Dazu zählen sowohl automatisierte als auch semi-automatisierte Systeme [REFA90].</p> <p>Im Rahmen dieser Arbeit werden mit dem Begriff Produktionssystem die Anlagen bzw. Komponenten oder Betriebsmittel und Prozesse zur Herstellung zusammengefasst.</p>
Produktionssystementwicklung	<p>Nach Cochran deckt die Produktionssystementwicklung alle Aspekte von der Erstellung bis hin zum Betrieb von Produktionssystemen ab. Die Erstellung beinhaltet dabei die Auswahl der Komponenten, die Anordnung der Komponenten, die Gestaltung der Arbeitsabläufe und die Entwicklung des Material- und Informationsflusses usw. [CADL01]</p>
Produktionssystemplanung	<p>Müller verwendet die Begriffe Produktionssystemplanung und Produktionsplanung als Synonyme und definiert sie als „[...] die Tätigkeiten zur Gestaltung eines Produktionssystems [...]“ [Müll08].</p> <p>In dieser Arbeit wird der Begriff Produktionsplanung jedoch analog zur Produktplanung für eine vorgelagerte Planungsphase verwendet, in der Wettbewerber, die Märkte sowie verfügbare Technologien analysiert werden.</p>
Produktplanung	<p>Die Produktplanung „[...] dient zur Gestaltung des Angebots eines Unternehmens abhängig von den Zielmärkten und den dort erzielbaren Rentabilitäten und Marktführerschaften. Sie besteht aus den Phasen Forschung, Erstellen des Produktportfolios und Marketing“ [JaVa14].</p>

Prozessentwicklung	<p>Der Begriff Prozessentwicklung umfasst „[...] die Ausarbeitung der Fertigungsplanung und den Serienanlauf der Produktion. Ziel der Fertigungsplanung ist die Bestimmung der Arbeitsanweisungen und die Auswahl der Fertigungsmittel“ [Boss07]. Bossmann verwendet den Begriff als Synonym zur technischen Produktionsplanung [Boss07].</p> <p>Der Begriff Prozessentwicklung hat in der Verfahrenstechnik eine andere Bedeutung und beschreibt die Tätigkeiten, um ein neues Verfahren bzw. einen neuen Prozess zu entwickeln.</p>
Ressourcen	<p>Mildner definiert alle Stoffe, die aus der Natur entnommen und dem Menschen zur Verfügung gestellt werden können, als natürliche Ressourcen. Im deutschen Sprachgebrauch wird Rohstoff oft als Synonym verwendet. Dabei unterscheidet sie zwischen erneuerbaren und erschöpfbaren Ressourcen. [Mild10]</p> <p>Mitarbeiter, Maschinen oder auch Lieferanten werden teilweise auch als Ressourcen verstanden [ELPS05]. In dieser Arbeit sind mit dem Begriff Ressourcen die natürlichen Ressourcen gemeint.</p>
Ressourceneffizienz	<p>Die Ressourceneffizienz beschreibt das „Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür nötigen Ressourceneinsatz“ [VDI4800]. Eine Erhöhung der Ressourceneffizienz bedeutet die relative oder absolute Senkung der Ressourcennutzung [VDI4800].</p>
Simultaneous Engineering	<p>Eversheim definiert den Begriff Simultaneous Engineering als „[...] die integrierte und zeitlich parallele Produkt- und Prozessgestaltung mit dem Ziel die Time-to-Market zu verkürzen, die Entwicklungs- und Herstellkosten zu reduzieren und die Produktqualität im umfassenden Sinn zu verbessern“ [EvSA05].</p>

Technische Produktionsplanung	Die Technische Produktionsplanung beschreibt die einmaligen planerischen Maßnahmen, „[...] die das räumliche und zeitliche Zusammenwirken von Mensch und Betriebs- bzw. Arbeitsmittel unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen zur Herstellung von Serienerzeugnissen vorbereiten und sicherstellen“ [Zenn06].
Technologiekette	Fallböhmer versteht unter einer Technologiekette „[...] die abstrakte produktionsmittelunabhängige Kombination von Fertigungstechnologien bzw. Fertigungsverfahren in definierter Reihenfolge zur Herstellung [...]“ [Fall00] von Produkten.
Umweltauswirkungen	Umweltauswirkungen sind jede positive oder negative Veränderung der Umwelt, die ganz oder teilweise auf Tätigkeiten, Produkte oder Dienstleistungen einer Organisation zurückzuführen ist [EG2009].
Werkstoff	Nach Ondracek wird „[...] ein Material zum Werkstoff , wenn sein fester Aggregatzustand technisch verwertbare Eigenschaften besitzt und es technologisch und wirtschaftlich machbar ist“ [Ondr79].
Wirkprinzip	Der Zusammenhang zwischen physikalischem Effekt und geometrischen und stofflichen Merkmalen wird als Wirkprinzip bezeichnet. Das Wirkprinzip kann als eine erste Teillösung für eine Funktion angesehen werden. [PBFG06]